

TUGAS AKHIR - TE 141599

**OPTIMASI PENEMPATAN UPFC PADA SISTEM TRANSMISI
275 KVAC KALIMANTAN UNTUK PERBAIKAN STABILITAS
TEGANGAN MENGGUNAKAN *GRAVITATIONAL SEARCH
ALGORITHM***

Denny Aprianus Situmorang
NRP 07111440000059

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**OPTIMASI PENEMPATAN UPFC PADA SISTEM TRANSMISI
275 KVAC KALIMANTAN UNTUK PERBAIKAN STABILITAS
TEGANGAN MENGGUNAKAN *GRAVITATIONAL SEARCH
ALGORITHM***

Denny Aprianus Situmorang
NRP 07111440000059

Dosen Pembimbing
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

***PLACEMENT OPTIMIZATION OF UPFC IN 275 KVAC
BORNEO TRANSMISSION SYSTEM FOR VOLTAGE
STABILITY IMPROVEMENT USING GRAVITATIONAL
SEARCH ALGORITHM***

Denny Aprianus Situmorang
NRP 07111440000059

Supervisors

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

Halaman ini sengaja dikosongkan.

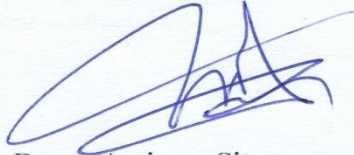
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Optimasi Penempatan UPFC pada Sistem Transmisi 275 KVAC Kalimantan untuk Perbaikan Stabilitas Tegangan Menggunakan Gravitational Search Algorithm**” adalah benar-benar hasil karya mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018



Denny Aprianus Situmorang
07111440000059

Halaman ini sengaja dikosongkan.

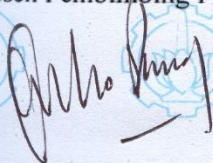
**OPTIMASI PENEMPATAN UPFC PADA SISTEM
TRANSMISI 275 KVAC KALIMANTAN UNTUK
PERBAIKAN STABILITAS TEGANGAN
MENGUNAKAN GRAVITATIONAL SEARCH
ALGORITHM**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan,
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

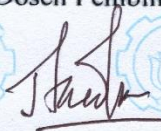
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
NIP. 194907151974121001

Dosen Pembimbing II



Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.
NIP. 196509011991032002



Halaman ini sengaja dikosongkan.

Optimasi Penempatan UPFC pada Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan untuk Perbaikan Stabilitas Tegangan Menggunakan *Gravitational Search Algorithm*

Nama : Denny Aprianus Situmorang
Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Pembimbing II : Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

ABSTRAK

Permintaan daya listrik yang semakin meningkat menyebabkan pusat pembangkit ataupun sistem transmisi dapat mengalami gangguan, sehingga menimbulkan terjadinya pemadaman total. Gangguan tersebut mengakibatkan penurunan stabilitas tegangan serta *overload* pada saluran sehingga menurunkan tingkat keamanan sistem tenaga listrik. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan analisis kontingensi. Pada studi ini diusulkan penempatan *Unified Power Flow Controller* (UPFC) pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 sebagai solusi untuk perbaikan stabilitas tegangan dengan kasus kontingensi *line outage*. Pemodelan statis UPFC sebagai injeksi daya aktif dan reaktif pada bus tegangan sisi kirim dan sisi terima. Untuk mendapatkan penempatan optimal UPFC digunakan metode *Voltage Stability Index* (VSI) dan *Voltage Change Index* (VCI). Metode *Voltage Stability Index* digunakan untuk menentukan peringkat kontingensi. Metode *Voltage Change Index* digunakan sebagai penempatan optimal UPFC. Optimalisasi kapasitas UPFC menggunakan metode GSA (*Gravitational Search Algorithm*). Hasil yang diperoleh dari simulasi adalah penempatan optimal UPFC pada bus Kasongan dan bus Palangkaraya dengan nilai VCI tertinggi sebesar 0,02078. Hasil peningkatan aliran daya total sistem dengan metode GSA sebesar 86,85 MW. Hasil tersebut lebih besar dibandingkan metode VCI sebesar 73,94 MW. Hasil perubahan tegangan setelah penempatan UPFC terdapat pada bus 30 dan 36, dimana sebelum penempatan adalah 0,934 p.u dan setelah penempatan menjadi 0,961 p.u.

Kata Kunci : Analisis Kontingensi, *Gravitational Search Algorithm* (GSA), *Unified Power Flow Controller* (UPFC), *Voltage Stability Index* (VSI), *Voltage Change Index* (VCI)

Halaman ini sengaja dikosongkan.

Placement Optimization of UPFC in 275 KVAC Borneo Transmission System for Voltage Stability Improvement Using Gravitational Search Algorithm

Student Name : Denny Aprianus Situmorang
Supervisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Supervisor II : Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

ABSTRACT

The electric power demand that more increasing cause the power plant or transmission system can be interrupted, resulting in a blackout. Disturbance leads to decreased of voltage stability as well as overload on line thereby degradation the power system security level. To resolve the problem, a contingency analysis is required. In this study proposed the placement of Unified Power Flow Controller (UPFC) on 275 kVAC Borneo Transmission System in 2026 as a solution for voltage stability improvement with case of line outage contingency. Static modelling of UPFC as an active and reactive power injection on the sending end voltage and receiving end voltage. To obtain the optimal placement of UPFC used Voltage Stability Index (VSI) method and Voltage Change Index (VCI) method. Voltage Stability Index method is used to determine ranking contingency. Voltage Change Index method is used as optimal placement of UPFC. Optimization of UPFC capacity using GSA method (Gravitational Search Algorithm). The results is the optimal placement of UPFC on Kasongan bus and Palangkaraya bus with the highest value of VCI is 0,02078. The result of increase of system total power flow with GSA method equal to 86,85 MW. The result is greater than the VCI method equal to 73.94 MW. The result of the voltage change after the placement of UPFC is found on buses 30 and 36, which before placement is 0.934 p.u and after placement becomes 0.961 p.u.

Keywords : Contingency Analysis, Gravitational Search Algorithm (GSA), Unified Power Flow Controller (UPFC), Voltage Stability Index (VSI), Voltage Change Index (VCI)

Halaman ini sengaja dikosongkan.

KATA PENGANTAR

Segala puji serta syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Adapun studi ini berjudul **"Optimasi Penempatan UPFC pada Sistem Transmisi 275 KVAC Kalimantan untuk Perbaikan Stabilitas Tegangan Menggunakan *Gravitational Search Algorithm*"**. Studi ini disusun untuk memenuhi persyaratan kurikulum sarjana S1 pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah memberikan bantuan, baik secara langsung maupun tidak langsung selama penyusunan studi ini hingga selesai. Secara khusus ucapan terima kasih tersebut penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Harapan Situmorang dan Ibu Asna Simanullang selaku orang tua penulis yang telah membesarkan, mendidik serta memberikan semangat, doa dan dorongan kepada penulis.
2. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku Kepala Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
3. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I atas bantuan serta bimbingan beliau dalam penulisan studi ini.
4. Ibu Ir. Ni Ketut Aryani, M.T. selaku Dosen Pembimbing II atas bantuan serta bimbingan beliau dalam penulisan studi ini.
5. Seluruh dosen dan karyawan bidang studi Teknik Sistem Tenaga Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya atas ilmu, bimbingan dan bantuannya hingga penulis selesai menyusun studi ini.
6. Anggota Kontrakan Sukolilo Park Regency Blok H-13 yang telah memberikan motivasi dan dukungannya serta sebagai rumah kedua penulis di Surabaya.
7. Keluarga e-54 dan Keluarga Mahasiswa Katolik ITS yang telah memberikan dukungan dan motivasinya.
8. Mas Habibur dan rekan-rekan Lab. Simulasi Sistem Tenaga Listrik B103 yang telah memberikan bantuan ilmu pengetahuan serta dapat berdiskusi dengan baik sehingga studi ini dapat diselesaikan.

9. Atri Prasetyo Mukti dan Mery Teja Kusuma selaku teman satu topik yang telah membantu penulis dalam proses penyusunan studi ini. Disamping itu juga selalu senang diajak berdiskusi dan memberikan dukungan semangat satu sama lain.
10. Pinanggih Rossifulmi yang telah membantu dalam proses pengerjaan studi ini sehingga dapat selesai dengan baik dan maksimal. Disamping itu juga selalu senang untuk diajak berdiskusi dan memberikan semangat.
11. Keluarga Konoharu 2014 yaitu Felicius Rindy, Yan Andrian Sidharta, Andre Rutac, Kevin Mirekel, dan teman-teman lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. Terima kasih atas dukungan serta semangat yang tiada henti kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan studi ini dengan baik dan tepat waktu.

Penulis menyadari bahwa pengerjaan studi ini tidak sempurna, baik dari segi materi maupun penyajiannya. Untuk itu saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan dalam penyempurnaan studi ini.

Terakhir penulis berharap, semoga studi ini dapat memberikan hal yang bermanfaat dan menambah wawasan bagi pembaca dan terkhusus bagi penulis.

Surabaya, Juli 2018
Penulis,

(Denny Aprianus Situmorang)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika	4
1.7 Relevansi.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.1.1 Pembangkit Listrik.....	7
2.1.2 Transmisi Tenaga Listrik	8
2.1.3 Distribusi Tenaga Listrik	16
2.1.4 Beban	16
2.2 Besaran Per Satuan (Per Unit).....	16
2.3 Analisis Aliran Daya	17
2.3.1 Persamaan Aliran Daya [1, 4]	18
2.3.2 Aliran Daya dan Rugi-Rugi Saluran	20
2.3.3 Metode <i>Newton Raphson</i>	21

2.4	Analisis Kontingensi.....	24
2.5	Kestabilan Tegangan Sistem Tenaga Listrik.....	25
2.6	<i>Voltage Stability Index</i> (VSI) [9, 10]	26
2.7	<i>Voltage Change Index</i> (VCI) [9].....	29
2.8	<i>Unified Power Flow Controller</i> (UPFC) [11, 12, 13, 14]	30
2.8.1	Pemodelan UPFC	31
2.9	<i>Gravitational Search Algorithm</i> (GSA) [15]	32
2.9.1	Hukum Gravitasi [15].....	33
2.9.2	Algoritma GSA.....	35

BAB III PEMODELAN SISTEM TENAGA LISTRIK DAN METODOLOGI PENYELESAIAN.....41

3.1	Data Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026	41
3.2	Penentuan Kontingensi dengan <i>Voltage Stability Index</i> (VSI) ...	53
3.3	Metodologi Simulasi.....	54
3.4	Optimasi Kapasitas UPFC dengan GSA.....	55

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISIS59

4.1	Data Simulasi.....	59
4.2	Simulasi Sistem Tenaga Listrik Sebelum Penempatan UPFC dengan Kasus Kontingensi.....	59
4.2.1	Simulasi Aliran Daya dan Nilai <i>Voltage Stability Index</i> Pada Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026	60
4.2.2	Analisis Kontingensi Pada Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026	70
4.3	Penempatan UPFC dengan Metode <i>Voltage Stability Index</i> (VSI) dan <i>Voltage Change Index</i> (VCI)	73
4.4	Analisis Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC dengan Metode <i>Voltage Change Index</i> (VCI)	75

4.5 Analisis Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC dengan Metode Optimasi GSA (<i>Gravitational Search Algorithm</i>).....	83
4.6 Analisis Profil Tegangan Setelah Pemasangan UPFC	91
4.7 Analisis <i>Voltage Stability Index</i> (VSI) pada Saluran Setelah Pemasangan UPFC.....	94
BAB V PENUTUP	97
5.1 Kesimpulan	97
5.2 Saran	97
DAFTAR PUSTAKA	99
LAMPIRAN.....	101
RIWAYAT HIDUP PENULIS.....	117

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Rangkaian Pengganti Saluran Transmisi [1]	8
Gambar 2.2	Rangkaian Ekuivalensi Saluran Transmisi Pendek [1]	9
Gambar 2.3	Rangkaian Saluran Transmisi Rangkaian Φ (π) [1]	11
Gambar 2.4	Rangkaian Saluran Transmisi Rangkaian T [1]	13
Gambar 2.5	Rangkaian Ekuivalen Saluran Transmisi Panjang [1]	14
Gambar 2.6	Tipikal Bus Sistem Tenaga Listrik [1]	18
Gambar 2.7	Pemodelan Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya dan Rugi-Rugi Daya [1]	20
Gambar 2.8	Pemodelan Saluran Transmisi dengan Admitansi [9]	27
Gambar 2.9	Rangkaian Dasar UPFC [12, 13]	30
Gambar 2.10	Pemodelan Statis UPFC [9, 13]	32
Gambar 3.1	Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026....	41
Gambar 3.2	Diagram Alir Penentuan Peringkat Kontigensi Line Outage Menggunakan Voltage Stability Index (VSI)	53
Gambar 3.3	Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi	54
Gambar 3.4	Diagram Alir Algoritma GSA.....	56
Gambar 4.1	Grafik Profil Tegangan Sebelum Penempatan UPFC (a) bus no 1-28, (b) bus no. 29-56, (c) bus no. 57-84, (d) bus no. 85-112, (e) bus no. 113-141	62
Gambar 4.2	Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Kontingensi pada Saluran 29-36 (a) bus no. 1-28, (b) bus no. 29-56, (c) bus no. 57-84, (d) bus no. 85-112, (e) bus no. 113-141 ..	73
Gambar 4.3	Grafik Profil Tegangan Setelah Penempatan UPFC dengan Metode VCI dan Metode GSA (a) bus no. 1-28, (b) bus no. 29-56, (c) bus no. 57-84, (d) bus no. 85-112, (e) bus no. 113-141	93

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Data Pembebanan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026	42
Tabel 3.2	Data Pembangkitan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026	49
Tabel 4.1	Hasil Aliran Daya dan VSI Setiap Saluran Sebelum Penempatan UPFC	62
Tabel 4.2	Hasil Simulasi Kontingensi dengan Pembebanan 80%	70
Tabel 4.3	Nilai VCI untuk Penempatan Optimal UPFC.....	74
Tabel 4.4	Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Saluran 29-36 dengan Metode Metode VCI.....	75
Tabel 4.5	Penurunan Pembebanan pada Saluran Setelah Penempatan UPFC.....	83
Tabel 4.6	Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Saluran 29-36 dengan GSA (<i>Gravitational Search Algorithm</i>)	84
Tabel 4.7	Nilai VSI Setelah Penempatan UPFC pada Saluran 29-36 dengan Mempertimbangkan Kontingensi.....	94

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem tenaga listrik saat ini terus berkembang pesat. Disamping itu kebutuhan tenaga listrik terus bertambah setiap tahun. Untuk itu diperlukan adanya pengembangan sistem kelistrikan supaya lebih andal serta lebih aman [1]. Sistem transmisi di Kalimantan juga terus mengalami perkembangan. Hal ini dibuktikan dengan adanya perencanaan sistem transmisi dengan level tegangan 275 kVAC. Kebutuhan beban yang semakin bertambah akan mempengaruhi kapasitas serta kemampuan sistem dalam penyaluran daya. Pusat pembangkit harus memberikan suplai daya listrik secara kontinu supaya permintaan beban dapat terpenuhi dengan cepat dan tepat, dalam hal ini konsumen listrik. Oleh karena itu sistem transmisi dituntut untuk beroperasi hingga mendekati batas kestabilan [2]. Untuk itu diperlukan studi analisis kontingensi untuk menentukan kapasitas saluran maupun bus sistem ketika terjadi gangguan. Kontingensi diartikan sebagai kasus dimana terjadinya pemutusan saluran transmisi ataupun lepasnya unit pembangkit. Dampak adanya kontingensi dapat menimbulkan ketidakstabilan tegangan.

Kestabilan tegangan merupakan hal utama yang harus dimiliki oleh sistem tenaga untuk mencapai kualitas sistem yang andal. Namun ketidakstabilan tegangan yang mengarah pada *voltage collapse* menjadi ancaman utama untuk sistem operasi tenaga listrik yang aman [3]. Faktor utama yang menyebabkan munculnya ketidakstabilan tegangan yaitu keadaan dimana sistem tenaga tidak mampu memenuhi permintaan daya reaktif, karakteristik beban yang terhubung, karakteristik peralatan yang mengkompensasi daya reaktif [3]. Adanya ketidakstabilan tegangan menyebabkan sistem mengalami gangguan. Untuk itu dilakukan penjadwalan ulang serta pelepasan beban supaya sistem terhindar dari *voltage collapse*. Langkah yang paling tepat yaitu mengurangi penyaluran daya reaktif ataupun memasang peralatan penyuplai daya reaktif tambahan.

FACTS (*Flexible AC Transmission System*) *devices* saat ini banyak digunakan pada berbagai sistem tenaga listrik untuk meningkatkan kontrol tegangan dan kerja sistem yang dinamis. FACTS *devices* bekerja secara fleksibel dalam melakukan penyaluran daya reaktif

serta membantu dalam pengoperasian jaringan listrik. Salah satu FACTS *devices* yang sangat komprehensif yaitu UPFC (*Unified Power Flow Controller*). UPFC merupakan jenis FACTS *devices* yang digunakan untuk pengaturan tegangan dan aliran daya pada saluran transmisi. Efektivitas dari FACTS *devices* bergantung pada lokasi penempatan. Penempatan tersebut memperhitungkan beberapa aspek penting antara lain peningkatan stabilitas tegangan, perbaikan profil tegangan, peningkatan kestabilan dinamis dan meminimalisasi rugi daya. Pada studi ini, UPFC dipilih sebagai solusi karena dianggap sangat unggul dan fleksibel. Penentuan besar kapasitas UPFC yang digunakan menggunakan GSA (*Gravitational Search Algorithm*). Sedangkan untuk pemilihan lokasi penempatan UPFC yang optimal menggunakan metode *Voltage Stability Index* (VSI) dan *Voltage Change Index* (VCI).

1.2 Permasalahan

Pada studi ini terdapat beberapa permasalahan yang akan dibahas. FACTS Devices yang dipilih yaitu UPFC digunakan untuk memperbaiki stabilitas tegangan pada Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026. Kasus kontingensi dilakukan untuk mengetahui keandalan sistem dengan mempertimbangkan lepasnya satu saluran. *Voltage Stability Index* (VSI) digunakan untuk menentukan peringkat kontingensi terburuk. *Voltage Change Index* (VCI) digunakan untuk menentukan penempatan optimal dari UPFC. GSA (*Gravitational Search Algorithm*) digunakan untuk menentukan optimasi besar kapasitas dari UPFC.

1.3 Batasan Masalah

Masalah yang penulis angkat pada studi ini adalah sebagai berikut :

1. Sistem yang dimodelkan menggunakan sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026.
2. Pemodelan dari *single line diagram* sistem menggunakan DigSILENT dan simulasi penentuan besar kapasitas UPFC menggunakan Matlab R2014a.
3. Analisis aliran daya sistem menggunakan metode Newton Raphson.
4. Bagian detail mengenai *Voltage Source Converter* (VSC) pada UPFC tidak dibahas dalam studi ini.

5. Studi ini hanya dilakukan satu penempatan UPFC pada sistem transmisi 275 KVAC Kalimantan tahun 2026.
6. Pada studi ini tidak mempertimbangkan kapasitas pada saluran.

1.4 Tujuan

Tujuan yang diharapkan dari studi ini yaitu sebagai berikut :

1. Melakukan analisis penentuan kapasitas UPFC pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 menggunakan *Gravitational Search Algorithm* (GSA).
2. Menentukan peringkat kontingensi *line outage* pada saluran dengan metode *Voltage Stability Index* (VSI).
3. Melakukan analisis penentuan lokasi penempatan optimal UPFC pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 menggunakan *Voltage Change Index* (VCI).
4. Melakukan studi mengenai perbedaan besar aliran daya dan rugi-rugi daya sebelum dan sesudah penempatan UPFC yang optimal berdasarkan metode *Voltage Change Index* (VCI) dan metode *Gravitational Search Algorithm* (GSA).
5. Melakukan studi peningkatan stabilitas tegangan pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 sebelum dan setelah dilakukan kontingensi *line outage*.
6. Melakukan studi perbandingan peningkatan stabilitas tegangan setelah penempatan UPFC antara metode *Voltage Stability Index* (VSI) dan *Voltage Change Index* (VCI) serta metode GSA (*Gravitational Search Algorithm*).

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam studi ini sebagai berikut :

1. Melakukan Studi Literatur
Adanya studi literatur ditujukan untuk menunjang penguasaan materi serta metode yang digunakan pada studi ini. Sumber yang digunakan antara lain jurnal, paper, artikel dan buku yang berhubungan dengan pelaksanaan studi.
2. Pengumpulan Data
Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data yang digunakan dalam studi ini yaitu data sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 yang meliputi data pembangkitan, data saluran, serta data pembebanan setiap wilayah.

3. **Pemodelan Sistem**

Pada tahap ini pemodelan sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 dirancang dalam bentuk *single line diagram* menggunakan DigSILENT PowerFactory 15.1. Data yang diperoleh dimasukkan kedalam pemodelan sistem. Hal tersebut dilakukan supaya tercapai analisis aliran daya.

4. **Simulasi Aliran Daya**

Simulasi aliran daya dan simulasi kontingensi pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 dengan software DigSILENT PowerFactory 15.1. Hasil simulasi digunakan untuk mengetahui aliran daya pada sistem yaitu magnitudo tegangan setiap bus, daya aktif, daya reaktif dan rugi-rugi daya pada saluran. Simulasi dari algoritma *Gravitational Search Algorithm* dilakukan pada software Matlab 2014a.

5. **Analisis dan Perbandingan**

Setelah dilakukan simulasi aliran daya, dihitung nilai *Voltage Stability Index* (VSI) dari setiap saluran. Dari hasil simulasi kontingensi, didapatkan keadaan *overload* pada saluran diatas 80%. UPFC ditempatkan satu per satu pada saluran yang mengalami kontingensi dan mengamati perubahan tegangan. *Voltage Change Index* (VCI) dilakukan sebagai penempatan optimal dari UPFC. Selanjutnya dilakukan analisis dan perbandingan peningkatan stabilitas tegangan saat sebelum dan sesudah kontingensi. Kemudian dilakukan analisis dan perbandingan peningkatan stabilitas tegangan sebelum dan sesudah penempatan UPFC

6. **Penyusunan Akhir**

Proses ini dilakukan dengan rangkuman kesimpulan akhir dari beberapa rangkaian metodologi diatas untuk menggambarkan hasil serta analisa dan simulasi yang telah dilakukan.

1.6 Sistematika

Sistematika yang dipakai dalam penyusunan studi ini yaitu terdiri dari lima bab dengan uraian sebagai berikut:

BAB I : Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang dari pelaksanaan studi, permasalahan yang dibahas, batasan masalah, tujuan, metodologi pengerjaan studi, sistematika serta relevansi dari penulis.

BAB II : Tinjauan Pustaka

Bab ini memuat tentang teori-teori yang menunjang dalam pengerjaan studi ini antara lain sistem tenaga listrik, transmisi tenaga listrik, analisis aliran daya dengan metode Newton Raphson, kestabilan tegangan, teori mengenai *Voltage Stability Index* (VSI) dan *Voltage Change Index* (VCI), teori mengenai UPFC, teori dan metode optimasi menggunakan GSA (*Gravitational Search Algorithm*).

BAB III : Pemodelan Sistem Tenaga Listrik dan Metodologi Penyelesaian

Bab ini membahas tentang data awal dari sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026, pemodelan simulasi dan program simulasi yang akan dianalisis.

BAB IV : Hasil Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas mengenai hasil simulasi penempatan dan besar kapasitas yang optimal dari UPFC dan analisis data setelah proses simulasi telah dijalankan.

BAB V : Penutup

Bab ini membahas mengenai kesimpulan yang diambil berdasarkan kasus yang dipilih dan hasil simulasi. Selain itu adanya saran dapat memberikan perbaikan dan penyempurnaan untuk pelaksanaan studi selanjutnya.

1.7 Relevansi

Dengan adanya studi ini diharapkan dapat memberikan manfaat adalah sebagai berikut :

1. Dapat digunakan sebagai rekomendasi bagi PLN untuk pengkajian sistem tenaga khususnya sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan.
2. Dapat digunakan sebagai referensi terkait perbaikan stabilitas tegangan pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan untuk penelitian selanjutnya.
3. Dapat digunakan sebagai referensi terkait penentuan kapasitas dan penempatan optimal dari FACTS devices pada sistem transmisi untuk penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Listrik menjadi salah satu penentu kehidupan masyarakat saat ini. Tidak heran saat ini listrik menjadi nyawa bagi semua umat manusia. Daya listrik merupakan suatu bentuk energi yang mudah untuk ditransmisikan, mudah diubah menjadi bentuk energi lain serta lebih murah [1]. Pada kenyataannya, listrik berkaitan erat dengan segi ekonomi. Kehidupan masyarakat dikatakan berkembang apabila kebutuhan listrik di daerah tersebut dapat terpenuhi dengan baik. Apabila suatu daerah tidak mendapatkan suplai daya listrik yang maksimal, maka perkembangan ekonomi di daerah tersebut akan terhambat.

Sejalan dengan pertumbuhan ekonomi yang terus meningkat, maka permintaan akan pasokan listrik akan terus meningkat. Namun permintaan daya listrik harus diimbangi dengan penambahan kapasitas maupun kemampuan baik dari segi pembangkitan dan segi penyaluran. Permintaan listrik yang terus meningkat akan menyebabkan munculnya gangguan. Umumnya gangguan yang ditemukan saat permintaan listrik yang terus meningkat adalah jatuh tegangan yang tinggi serta ketidakstabilan tegangan.

Sistem tenaga listrik merupakan sistem yang saling berhubungan, sehingga diperlukan suatu sistem interkoneksi yang baik dan andal dikarenakan selain pengiriman daya listrik melalui saluran transmisi terdapat pembangkit listrik dengan komposisi energi tiap pembangkit listrik dan pusat-pusat beban untuk meminimalkan total kapasitas daya dan biaya. Penjelasan lebih detail mengenai komponen dalam sistem tenaga listrik akan dibahas pada bagian selanjutnya.

2.1.1 Pembangkit Listrik

Pembangkit listrik merupakan salah satu bagian utama dalam sistem tenaga listrik, dimana berfungsi untuk mengubah energi primer menjadi energi listrik. Pada pembangkit listrik terdapat turbin sebagai penggerak mula dan generator sebagai pembangkit listrik. Umumnya bagian dari pembangkit listrik meliputi transformator daya, peralatan pengaman dan pengatur. Generator merupakan salah satu komponen yang paling penting dalam sistem tenaga listrik, dimana dapat mengubah energi

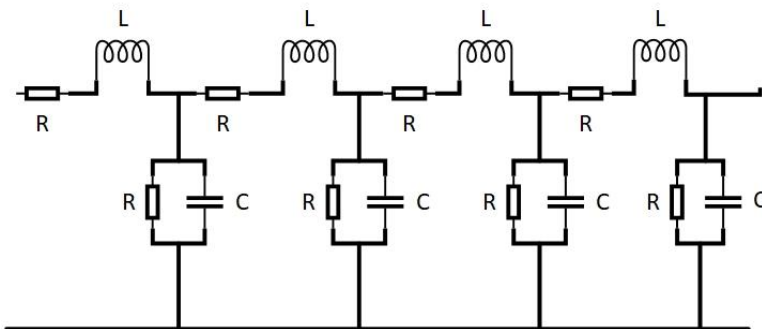
mekanik menjadi energi listrik [1]. Pembangkit listrik konvensional saat ini terdiri dari :

1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)
2. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)
3. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)
4. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)
5. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)
6. Pembangkit Listrik Tenaga Gas Alam (PLTG)

Pembangkit listrik saat ini sudah banyak berkembang dengan pesat. Munculnya pembangkit-pembangkit listrik dengan menggunakan sumber energi baru dan terbarukan dapat menjadi alternatif lain ketika pembangkit lama sudah tidak dapat beroperasi dengan normal.

2.1.2 Transmisi Tenaga Listrik

Transmisi merupakan salah satu komponen penting dalam sisten tenaga listrik, dimana berfungsi untuk mengirimkan daya listrik dari sisi pembangkitan hingga ke sisi pusat beban yaitu konsumen listrik [1]. Pada sistem tenaga listrik, tegangan dinaikkan untuk mengurangi tegangan jatuh serta rugi-rugi daya dikarenakan pada proses penyaluran daya listrik memerlukan saluran yang cukup panjang. Jarak yang cukup jauh dari pusat pembangkit hingga ke pusat beban menyebabkan penurunan tegangan akibat adanya arus yang mengalir pada konduktor dan rugi-rugi daya. Umumnya rugi-rugi daya yang dihasilkan dapat berupa panas berlebih pada konduktor kabel yang dialiri oleh arus yang berlebih.



Gambar 2.1 Rangkaian Pengganti Saluran Transmisi [1]

Keterangan gambar :

R = Resistansi saluran (Ω)

L = Induktansi saluran (H)

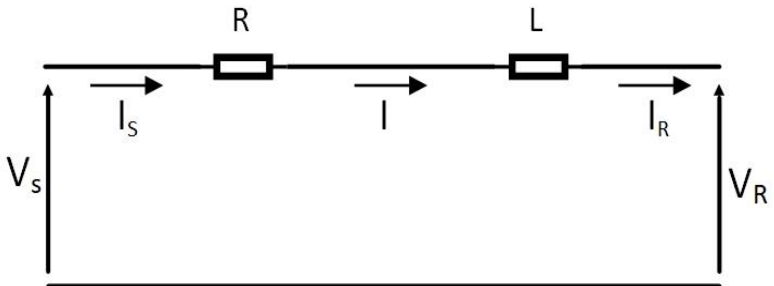
C = Kapasitansi saluran (F)

Pada gambar 2.1 tersebut menjelaskan parameter-parameter pada saluran antara lain resistansi, kapasitansi, reaktansi dan konduktansi yang tersebar. Selanjutnya dalam pemodelan saluran transmisi parameter yang ditentukan bergantung pada panjang dari saluran. Semakin panjang saluran maka nilai parameter yang ditentukan akan semakin besar. Berdasarkan jenis salurannya, saluran transmisi dibedakan menjadi Saluran Udara (*Overhead Lines*), Saluran Kabel Tanah (*Underground Lines*) dan Saluran Kabel Laut (*Submarine Lines*). Berdasarkan panjang salurannya saluran transmisi dikelompokkan menjadi 3 bagian sebagai berikut :

1. Saluran Transmisi Pendek
2. Saluran Transmisi Menengah
3. Saluran Transmisi Panjang

2.1.2.1 Saluran Transmisi Pendek

Saluran transmisi jarak pendek merupakan jenis saluran transmisi yang digunakan pada sisi konsumen akhir listrik. Panjang dari saluran transmisi pendek yaitu kurang dari 80 km (50 miles) dan rating tegangan kurang dari 69 kV sehingga nilai kapasitansi saluran dapat diabaikan [1]. Gambar 2.2 merupakan rangkaian ekivalen dari saluran transmisi pendek.



Gambar 2.2 Rangkaian Ekivalensi Saluran Transmisi Pendek [1]

Keterangan gambar :

V_S = Tegangan sisi kirim (Volt)

V_R = Tegangan sisi terima (Volt)

I_S = Arus sisi kirim (Ampere)

I_R = Arus sisi terima (Ampere)

Z = $(R+jX_L)$ = Impedansi saluran (ohm)

P_S = Daya sisi kirim (Watt)

P_R = Daya sisi terima (Watt)

η = efisiensi (%)

Berdasarkan gambar 2.2 rangkaian berikut dapat diselesaikan dengan perhitungan rangkaian AC seri sederhana dimana dimodelkan dengan nilai R dan L. Dengan mengabaikan nilai kapasitansi pada saluran, maka arus sisi kirim (I_S) akan sama besar dengan arus sisi terima (I_R) [1].

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.1)$$

Besar tegangan pada sisi kirim dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.2)$$

Dengan parameter saluran sebagai berikut :

$$A = 1$$

$$B = Z$$

$$C = 0$$

$$D = 1$$

Daya pada sisi kirim dan sisi terima dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_S = V_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi \quad (2.3)$$

$$P_R = V_R \cdot I_R \cdot \cos \varphi \quad (2.4)$$

Efisiensi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} \times 100\% \quad (2.5)$$

2.1.2.2 Saluran Transmisi Menengah

Saluran transmisi menengah merupakan saluran transmisi yang memiliki panjang antara 80 km (50 miles) hingga mencapai 250 km (150 miles) [1]. Saluran transmisi ini memiliki nilai kapasitansi yang cukup besar, sehingga diperlukan perhitungan dalam pemodelan saluran tersebut. berdasarkan salurannya, saluran transmisi menengah dibedakan menjadi 2 tipe yaitu :

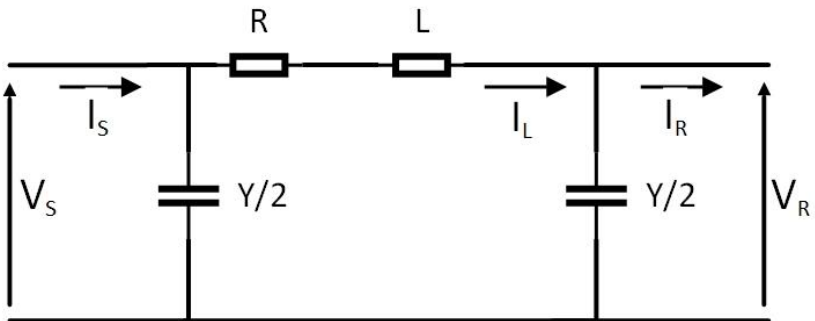
1. Saluran transmisi menengah dengan rangkaian T

Saluran transmisi menengah dengan rangkaian T merupakan jenis saluran transmisi dengan pusat kapasitansi berada pada satu titik dan impedansi seri terbagi dua pada kedua cabang.

2. Saluran transmisi menengah dengan rangkaian Phi

Saluran transmisi menengah dengan rangkaian Phi (π) merupakan jenis saluran transmisi dengan pusat kapasitansi berada pada titik awal dan titik akhir serta impedansi seri terpusat pada satu titik pada cabang seri.

Pada pemodelan saluran transmisi menengah dengan rangkaian Phi, besar admitansi shunt dari saluran akan dibagi dua sama besar kemudian ditempatkan pada ujung pengirim dan ujung penerima [1]. Rangkaian ekuivalen dari saluran transmisi menengah dengan rangkaian Phi (π) ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Rangkaian Saluran Transmisi Rangkaian Phi (π) [1]

Keterangan gambar :

V_S = Tegangan sisi kirim (Volt)

I_S = Arus sisi kirim (Ampere)

V_R = Tegangan sisi terima (Volt)
 I_R = Arus sisi terima (Ampere)
 Z = $(R+jX_L)$ = Impedansi saluran (ohm)
 P_S = Daya sisi kirim (Watt)
 P_R = Daya sisi terima (Watt)
 η = efisiensi (%)

Arus pada sisi kirim dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.6)$$

Tegangan pada sisi kirim dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.7)$$

Dengan melihat parameter saluran yaitu sebagai berikut :

$$A = D = 1 + \frac{1}{2}YZ \quad (2.8)$$

$$B = Z \quad (2.9)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{1}{4}YZ \right) \quad (2.10)$$

$$Y = j\omega C \quad (2.11)$$

Daya pada sisi kirim dan sisi terima dapat dirumuskan sebagai berikut :

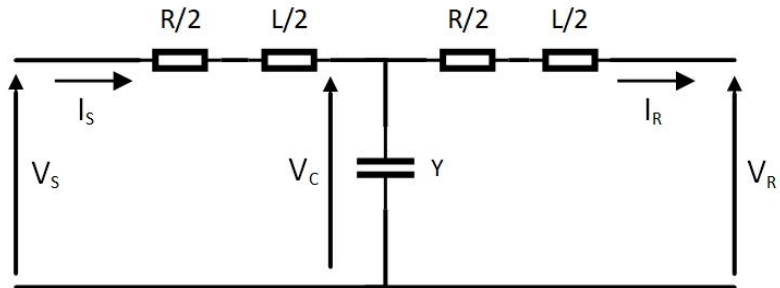
$$P_S = V_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi \quad (2.12)$$

$$P_R = V_R \cdot I_R \cdot \cos \varphi \quad (2.13)$$

Efisiensi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} \times 100\% \quad (2.14)$$

Saluran transmisi dengan rangkaian T ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rangkaian Saluran Transmisi Rangkaian T [1]

Keterangan gambar :

V_S = Tegangan sisi kirim (Volt)

I_S = Arus sisi kirim (Ampere)

V_R = Tegangan sisi terima (Volt)

I_R = Arus sisi terima (Ampere)

$Z = (R + jX_L) =$ Impedansi saluran (ohm)

P_S = Daya sisi kirim (Watt)

P_R = Daya sisi terima (Watt)

η = efisiensi (%)

Tegangan pada sisi kirim dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.15)$$

Arus pada sisi kirim dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.16)$$

Dengan memperhatikan parameter saluran sebagai berikut :

$$A = D = 1 + \frac{1}{2}YZ \quad (2.17)$$

$$B = Z \left(1 + \frac{1}{4}YZ \right) \quad (2.18)$$

$$C = Y \quad (2.19)$$

$$Y = j\omega C \quad (2.20)$$

Daya pada sisi kirim dan terima dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_S = V_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi \quad (2.21)$$

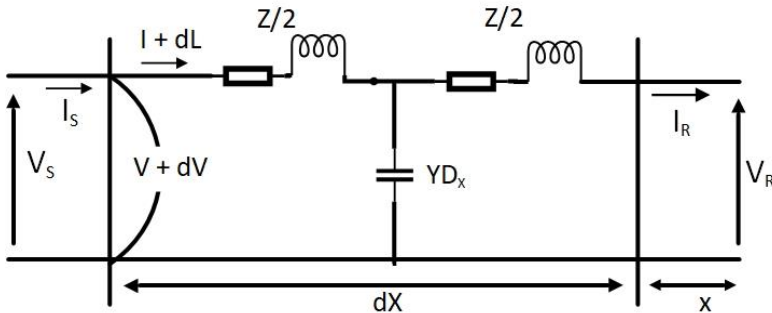
$$P_R = V_R \cdot I_R \cdot \cos \varphi \quad (2.22)$$

Efisiensi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} \times 100\% \quad (2.23)$$

2.1.2.3 Saluran Transmisi Panjang

Saluran transmisi panjang memiliki karakteristik panjang lebih dari atau sama dengan 150 km (250 miles). Parameter yang ditentukan terdistribusi secara merata pada setiap bagian saluran [1]. Namun untuk saluran transmisi dengan rangkaian Phi (π) maupun rangkaian T, keduanya tidak dapat merepresentasikan parameter yang ditentukan pada saluran transmisi panjang. Hal ini dikarenakan rangkaian tersebut tidak memperhitungkan parameter saluran terdistribusi merata.



Gambar 2.5 Rangkaian Ekivalen Saluran Transmisi Panjang [1]

Keterangan gambar :

V_S = Tegangan sisi kirim (Volt)

I_S = Arus sisi kirim (Ampere)
 V_R = Tegangan sisi terima (Volt)
 I_R = Arus sisi terima (Ampere)
 Z = $(R+jX_L)$ = Impedansi saluran (ohm)
 P_S = Daya sisi kirim (Watt)
 P_R = Daya sisi terima (Watt)
 η = efisiensi (%)

Tegangan pada sisi kirim dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.24)$$

Arus pada sisi kirim dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.25)$$

Dengan memperhatikan parameter saluran sebagai berikut :

$$A = D = 1 + \frac{1}{2}YZ \quad (2.26)$$

$$B = Z \left(1 + \frac{1}{6}YZ \right) \quad (2.27)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{1}{6}YZ \right) \quad (2.28)$$

$$Y = j\omega C \quad (2.29)$$

Daya pada sisi kirim dan sisi terima dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_S = V_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi \quad (2.30)$$

$$P_R = V_R \cdot I_R \cdot \cos \varphi \quad (2.31)$$

Efisiensi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\eta = \frac{P_R}{P_S} \times 100\% \quad (2.32)$$

2.1.3 Distribusi Tenaga Listrik

Distribusi tenaga listrik menjadi salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik. Jaringan distribusi berfungsi untuk meyalurkan daya listrik ke sisi konsumen listrik [1]. Sisi primer dari jaringan distribusi umumnya berkisar antara 4 sampai 3,5 kV [1]. Untuk sisi konsumen industri berkisar pada rating tegangan menengah yaitu 20 kV. Sisi sekunder jaringan distribusi akan menurunkan tegangan yang ditujukan untuk pengguna komersial dan residensial. Untuk sisi konsumen komersial dan residensial umumnya menggunakan rating tegangan rendah yaitu 380/220 Volt.

2.1.4 Beban

Beban merupakan bagian penerima akhir daya listrik dalam sistem tenaga listrik. beban pada sistem tenaga listrik dibagi menjadi beban industrial, komersial dan residensial. Untuk beban industri besar umumnya dihubungkan langsung dengan jaringan transmisi ataupun sub transmisi, sedangkan untuk beban industri menengah dihubungkan dengan jaringan distribusi primer. Untuk beban komersial disuplai dengan jaringan distribusi sekunder.

Pada pemodelan dari beban, beban dalam sistem tenaga listrik dikelompokkan menjadi 3 model beban yaitu [4]:

1. Beban direpresentasikan sebagai arus konstan. Dalam hal ini besar magnitude dari arus dijaga tetap konstan.
2. Beban direpresentasikan sebagai daya konstan. Dalam hal ini daya aktif (MW) dan daya reaktif (MVA_r) dianggap konstan.
3. Beban direpresentasikan sebagai impedansi konstan. Dalam hal ini beban dengan representasi ini digunakan dalam studi kestabilan.

2.2 Besaran Per Satuan (Per Unit)

Dalam melakukan analisis pada sistem tenaga listrik, umumnya digunakan besaran per satuan atau per unit (pu). Besaran per satuan atau per unit (pu) didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut [1] :

$$pu = \frac{\text{actual}}{\text{base}} \quad (2.33)$$

Untuk mencari nilai dari arus dasar (I_{base}), maka dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_{base} = \frac{KVA_{base1\phi}}{KV_{baseLN}} \quad (2.34)$$

Untuk mencari nilai dari impedansi dasar (Z_{base}), maka dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$\begin{aligned} Z_{base} &= \frac{(KV_{baseLN})^2 \times 1000}{KVA_{base1\phi}} \\ &= \frac{(KV_{baseLN})^2}{MVA_{base1\phi}} \end{aligned} \quad (2.35)$$

2.3 Analisis Aliran Daya

Pada dasarnya analisis aliran daya merupakan hal dasar dan utama dalam melakukan perencanaan dan pengembangan suatu sistem serta mengevaluasi sistem yang telah ada. Aliran daya didefinisikan sebagai bentuk penyaluran daya listrik dari pembangkit hingga ke beban melalui komponen sistem kelistrikan serta saluran transmisi yang terhubung dalam satu titik pertemuan dari semua komponen sistem [1]. Permasalahan utama dalam analisis aliran daya yaitu menentukan besar dan sudut fasa tegangan yang mengalir pada setiap bus serta daya aktif dan daya reaktif yang mengalir pada setiap saluran. Pada analisa aliran daya, Terdapat beberapa jenis bus pada suatu sistem tenaga beserta fungsi antara lain sebagai berikut [1] :

1. Bus Beban (*Load bus*)

Bus nongenerator disebut bus beban. Bus beban atau sering disebut P-Q bus terhubung dengan beban. Pada bus ini nilai daya aktif dan reaktif diketahui sehingga dapat digunakan untuk analisa aliran daya. Sedangkan besar dan sudut fasa tegangan tidak diketahui sehingga harus ditentukan.

2. Bus Referensi (*Slack bus*)

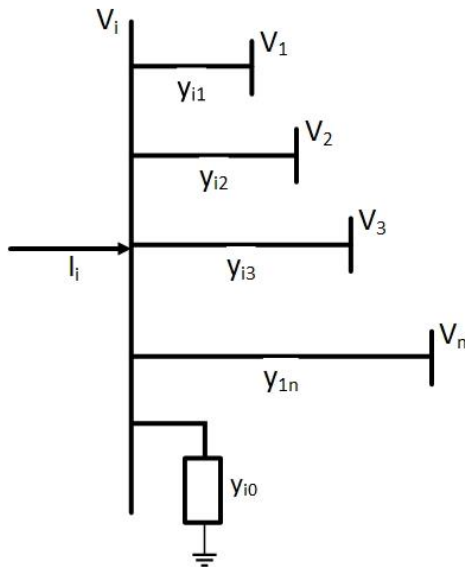
Slack bus atau *swing bus* merupakan bus yang terhubung dengan generator. Bus ini menjadi referensi bagi bus tegangan lainnya. Besar nilai dan sudut fasa tegangan diketahui, yang mana umumnya sudut fasa tegangan atau $\delta_1 = 0^\circ$, hal ini agar perhitungan lebih mudah. Slack bus akan mencatu kekurangan daya dan beban yang tidak dapat di suppai oleh generator lain. Nilai dari daya aktif dan reaktif ditentukan.

3. Bus Generator (*Voltage Controlled Bus*)

Bus tipe ini merupakan bus yang mana besar tegangan dijaga konstan. Daya aktif generator diatur oleh prime mover, serta besar tegangan diatur oleh sistem eksitasi generator. Oleh karena itu daya aktif dan besar tegangan diketahui. Sedangkan besar dari daya reaktif dan sudut fasa tegangan ditentukan. Bus generator sering disebut dengan istilah P-V bus.

2.3.1 Persamaan Aliran Daya [1, 4]

Pada sistem tenaga listrik, daya yang disalurkan tidak hanya melewati satu bus, melainkan beberapa bus yang saling terkoneksi satu sama lain. Adanya kelebihan daya pada salah satu bus akan dialirkan ke bus lain yang mengalami kekurangan daya. Untuk menentukan analisis aliran daya, maka ditentukan suatu persamaan matematis untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya.



Gambar 2.6 Tipikal Bus Sistem Tenaga Listrik [1]

Dengan menggunakan persamaan Kirchoff arus, maka persamaan aliran daya ditentukan sebagai berikut :

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \quad (2.36)$$

$$I_i = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}) V_i - y_{i1} V_1 - y_{i2} V_2 - \dots - y_{in} V_n \quad (2.37)$$

Keterangan :

V_i = Tegangan pada bus i

I_i = Arus pada bus i

y_{in} = Admitansi antara bus i dan bus N

y_{i0} = admitansi antara bus i dan ke tanah

Dari persamaan (2.36) dan (2.37), maka dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j, \quad j \neq 1 \quad (2.38)$$

Keterangan :

V_i = Tegangan pada bus i

V_j = Tegangan pada bus j

I_i = Arus pada bus i

y_{ij} = Admitansi antara bus i dan bus j

Daya aktif dan daya reaktif pada bus i ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.39)$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.40)$$

Keterangan :

V_i = Tegangan pada bus i

I_i = Arus pada bus i

P_i = Daya aktif pada bus i

Q_i = Daya reaktif pada bus i

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.38) dan (2.40) didapatkan hubungan antara daya aktif dan daya reaktif dengan admitansi pada saluran sebagai berikut :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j, \quad j \neq 1 \quad (2.41)$$

Keterangan :

V_i = Tegangan pada bus i

V_j = Tegangan pada bus j

y_{ij} = Admitansi antara bus i dan bus j

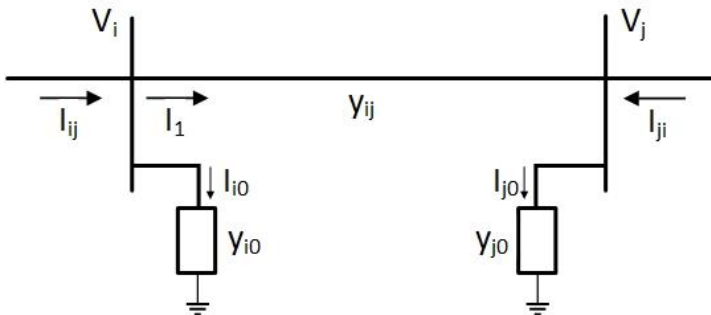
P_i = Daya aktif pada bus i

Q_i = Daya reaktif pada bus i

Dari Persamaan (2.41), diketahui bahwa nilai aliran daya pada bus i diperlukan adanya iterasi. Hal itu dikarenakan persamaan tersebut dalam persamaan aljabar non-linier.

2.3.2 Aliran Daya dan Rugi-Rugi Saluran

Dalam melakukan perhitungan aliran daya, diperlukan juga analisis tentang rugi-rugi daya pada saluran. Gambar 2.7 menunjukkan pemodelan saluran transmisi untuk menentukan aliran daya serta rugi-rugi daya pada saluran sebagai berikut.



Gambar 2.7 Pemodelan Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya dan Rugi-Rugi Daya [1]

Berdasarkan gambar 2.7, dapat dilihat bahwa aliran arus I_{ij} mengalir dari bus i menuju ke bus j sehingga apabila dilihat dari bus j maka nilai arus I_{ij} akan bernilai positif. Besar arus yang mengalir dari bus i menuju ke bus j dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_{ij} = I_1 + I_{j0} = y_{ij} (V_j - V_i) + y_{j0} V_i \quad (2.42)$$

Serupa dengan persamaan (2.42), aliran arus I_{ji} mengalir dari bus j menuju ke bus i sehingga apabila dilihat dari bus i maka nilai arus I_{ji} akan bernilai positif. Besar arus yang mengalir dari bus j menuju ke bus i dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_{ji} = -I_1 + I_{j0} = y_{ij} (V_j - V_i) + y_{j0} V_j \quad (2.43)$$

Untuk menghitung daya kompleks S_{ij} yang mengalir dari bus i menuju ke bus j , dan sebaliknya daya kompleks S_{ji} yang mengalir dari bus j menuju ke bus i dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.44)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2.45)$$

Dari persamaan (2.44) dan (2.45), dapat diketahui bahwa besar dari rugi-rugi daya yang muncul pada saluran transmisi merupakan penjumlahan aljabar dari kedua persamaan tersebut yaitu :

$$S_{L,ij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.46)$$

Keterangan :

$S_{L,ij}$ = Total rugi-rugi daya pada saluran transmisi (MW)

S_{ij} = Rugi-rugi daya dari bus i menuju bus j

S_{ji} = Rugi-rugi daya dari bus j menuju bus i

2.3.3 Metode Newton Raphson

Metode *Newton Raphson* saat ini umum digunakan dalam melakukan analisis aliran daya pada sistem tenaga listrik. Metode *Newton Raphson* memiliki konvergensi kuadratik yang baik, perhitungan yang

cepat serta lebih sedikit dalam penggunaan iterasi. Oleh karena itu, untuk konteks sistem tenaga listrik yang besar metode penyelesaian dengan *Newton Raphson* lebih praktis dan efisien.

Dari gambar 2.7, arus yang mengalir pada bus i berdasarkan persamaan (2.38) dapat dijelaskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.47)$$

Apabila persamaan (2.47) dijadikan dalam bentuk polar, maka menjadi persamaan sebagai berikut :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.48)$$

Daya kompleks pada bus i yaitu :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.49)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.48) ke dalam persamaan (2.49), maka didapatkan persamaan daya kompleks sebagai berikut :

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.50)$$

Dengan memisahkan komponen riil dan imajiner dari daya kompleks diatas, maka didapatkan daya aktif dan daya reaktif pada bus i sebagai berikut :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.51)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.52)$$

Keterangan :

- P_i = Daya aktif yang mengalir pada bus i
 Q_i = Daya reaktif yang mengalir pada bus i
 Y_{ij}, θ_{ij} = Magnitude dan sudut phasa elemen matriks admitansi Y
 V_i, δ_i = Magnitude tegangan dan sudut phasa pada bus ke- i
 V_j, δ_j = Magnitude tegangan dan sudut phasa pada bus ke- j

Setelah mengetahui besar tegangan dan daya tiap bus, maka akan ditentukan matriks Jacobian untuk iterasi selanjutnya. Matriks Jacobian terdiri dari empat komponen yaitu komponen H, komponen N, komponen J dan komponen L.

$$\text{Jacobian Matriks} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Dengan penjelasan tiap elemen matriks sebagai berikut :

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \quad (2.54)$$

$$N_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (2.55)$$

$$J_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \quad (2.56)$$

$$L_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (2.57)$$

Untuk mencari besar aliran daya pada tiap bus, dapat dituliskan persamaan beban sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Selanjutnya dari perkalian matriks *Jacobian* pada persamaan, akan didapatkan nilai dari $\Delta\theta_i$ dan $\Delta|V_i|$ yang digunakan sebagai *update* sudut dan magitude tegangan pada tiap bus.

$$\theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} + \Delta\theta_i \quad (2.59)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i| \quad (2.60)$$

Keterangan :

$(k + 1)$ = Jumlah iterasi dari Newton-Raphson

$\Delta|V_i|$ = Perubahan magnitude tegangan pada bus ke-*i*

$\Delta\theta_i$ = Perubahan sudut tegangan pada bus ke-*i*

Selisih daya aktif dan daya reaktif pada tiap bus antara sistem baru dengan sistem lama akan dibandingkan dimana ketelitian telah ditentukan. Nilai ketelitian sangat berkaitan. Apabila nilai ketelitian telah tercapai, maka proses iterasi dinyatakan selesai. Namun apabila nilai ketelitian belum tercapai maka proses iterasi tetap berlanjut hingga didapatkan ketelitian yang sesuai.

2.4 Analisis Kontingensi

Saat ini sistem tenaga listrik sudah melakukan interkoneksi antara satu pembangkit dengan pembangkit lainnya. Hal tersebut bertujuan untuk mencegah terjadinya lepas saluran transmisi dan daya listrik tetap berjalan dengan baik [5]. Akan tetapi pada kenyataannya, tetap terjadi pemadaman listrik di beberapa kota ataupun negara. Pemadaman ini sangat merugikan pihak penyedia listrik dan konsumen listrik. Untuk mengurangi gangguan tersebut dilakukan analisis kontingensi untuk mengetahui perubahan aliran daya dan tegangan bus saat putusnya saluran transmisi [6].

Kontingensi merupakan kejadian yang disebabkan oleh kegagalan atau pelepasan dari satu atau lebih saluran transmisi dan atau generator. Kontingensi N-1 adalah kontingensi yang dihasilkan dari terlepasnya satu komponen, sedangkan kontingensi N-k adalah kontingensi yang dihasilkan dari terlepasnya sejumlah k komponen.

Dari segi potensi kejadian kontingensi maka dapat dibedakan menjadi [5] :

1. *Credible Contingency*

Merupakan kejadian dimana pusat pengatur beban ataupun pusat pengatur daerah dianggap berpotensi terjadi dan sistem dapat melakukan pengamanan terhadap gangguan.

2. *Non Credible Contingency*

Merupakan kejadian dimana pusat pengatur beban ataupun pusat pengatur daerah menganggap kecil kemungkinan untuk terjadi.

Analisis kontingensi umumnya dibedakan menjadi dua yaitu sebagai berikut [5] :

1. Kontingensi Tunggal

Kontingensi ini terjadi apabila saluran transmisi ataupun transformator dilepas dari sistem untuk dilakukan *preventive maintenance*.

2. Kontingensi Jamak

Kontingensi ini terjadi apabila terdapat dua atau lebih saluran transmisi terlepas secara simultan.

2.5 Kestabilan Tegangan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga menjadi hal penting dalam sistem tenaga listrik. Kestabilan tegangan didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan pada tiap-tiap bus sistem saat kondisi operasi yang seimbang maupun keadaan setelah mengalami gangguan [7]. Hal tersebut sangat bergantung pada kemampuan menjaga keseimbangan antara permintaan beban dan suplai daya listrik dari pembangkit dengan baik. Munculnya ketidakstabilan tegangan disebabkan oleh beberapa faktor. Penyebab utama ketidakstabilan tegangan dari sebuah sistem tenaga listrik yaitu tegangan jatuh dikarenakan perubahan aliran daya melalui elemen induktif dari jaringan transmisi, lepasnya jaringan transmisi karena kerja dari relay proteksi tidak sesuai , lepasnya generator ataupun pembebanan yang terlalu berat pada jaringan transmisi serta on-load tap changing transformer tidak bekerja dengan baik [8]. Ketidakstabilan tegangan dapat mengakibatkan terjadi penurunan maupun kenaikan tegangan pada tiap bus.

Pada dasarnya ketidakstabilan tegangan merupakan fenomena yang sering terjadi dalam sebuah sistem tenaga listrik, namun dampak yang ditimbulkan sangat berpengaruh pada jaringan yang dapat menimbulkan adanya *voltage collapse* [8]. Fenomena *voltage collapse*

dihubungkan dengan ketidakmampuan dari sebuah sistem tenaga listrik untuk memenuhi suplai daya reaktif ke beban. Adapun beberapa contoh berkaitan dengan fenomena *voltage collapse* antara lain [8]:

1. Suplai daya reaktif yang terbatas dari generator dan pengurangan daya reaktif dikarenakan adanya kapasitor bank pada tegangan rendah.
2. Permintaan daya reaktif yang meningkat karena peningkatan permintaan beban.
3. Tingginya *losses* daya reaktif pada jaringan yang berbeban tinggi serta kemungkinan putusnya jaringan transmisi.

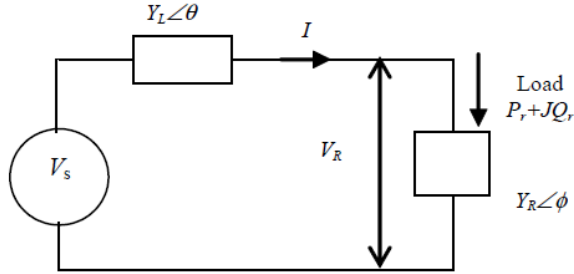
Dari penjelasan diatas, maka ketidakstabilan tegangan disebabkan oleh karakteristik dari sistem transmisi, batas daya reaktif generator, karakteristik peralatan pengkompensasi daya reaktif dan peralatan pengaturan tegangan seperti trafo *under-load tap changer* ULTC [8]. Berdasarkan jenis gangguannya, ketidakstabilan tegangan dikelompokkan menjadi dua kategori sebagai berikut [3, 7]:

1. Gangguan Besar dari Stabilitas Tegangan
Pada gangguan ini, sistem tenaga listrik dituntut untuk mempertahankan tegangan tiap bus pada sistem saat terjadi gangguan besar ketika kondisi operasi normal maupun ketika terjadi gangguan. Gangguan besar umumnya terjadi disebabkan oleh gangguan pada sistem seperti pelepasan beban tiba-tiba, generator lepas sinkron.
2. Gangguan Kecil dari Stabilitas Tegangan
Pada jenis gangguan ini, sistem tenaga listrik dituntut untuk mempertahankan tegangan pada tiap bus ketika terjadi gangguan kecil saat kondisi operasi normal maupun keadaan gangguan. Gangguan kecil umumnya disebabkan oleh perubahan bertahap pada beban dan perubahan tap changer pada transformer.

2.6 Voltage Stability Index (VSI) [9, 10]

Voltage Stability Index (VSI) merupakan besaran skalar yang dapat memprediksi hubungan antara ketidakstabilan tegangan dengan penilaian dari stabilitas sistem tenaga. Perubahan magnitude yang diikuti dengan perubahan parameter sistem dapat digunakan secara *online* maupun *offline* yang membantu operator dalam menentukan pendekatan perubahan dengan *voltage collapse*. Pada gambar 2.8, saluran transmisi direpresentasikan sebagai model admitansi dimana $Y_L \angle \theta$ adalah

admitansi saluran, $Y_R \angle \phi$ adalah admitansi beban dan $\phi = \tan^{-1}(Q_r/P_r)$. Beban dari saluran dianggap sebagai daya yang ditransfer pada ujung penerima dengan jalur tertentu.



Gambar 2.8 Pemodelan Saluran Transmisi dengan Admitansi [9]

Indeks ini dikembangkan dengan mempertimbangkan kondisi dimana hanya magnitudo beban yang bervariasi sedangkan besar sudut beban ϕ dijaga tetap konstan. Hal ini dilakukan untuk menjaga faktor daya beban tetap konstan. Kenaikan beban seiring dengan peningkatan admitansi akan mengakibatkan kenaikan arus dan drop saluran serta penurunan tegangan pada sisi penerima. Pada gambar 2.8, arus I dirumuskan sebagai berikut :

$$I = V_S Y_{eq} \quad (2.61)$$

dimana,

$$Y_{eq} = \left[\frac{Y_L Y_R}{[Y_L^2 + Y_R^2 + 2Y_L Y_R \cos(\theta - \phi)]^{0.5}} \right] \quad (2.62)$$

Tegangan V_R dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V_R = \frac{I}{Y_R} \quad (2.63)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan ke persamaan, maka V_R dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V_R = V_S \left[\frac{Y_L Y_R}{[Y_L^2 + Y_R^2 + 2Y_L Y_R \cos(\theta - \phi)]^{0.5}} \right] \quad (2.64)$$

Keterangan :

V_S = Tegangan sisi pengirim

V_R = Tegangan sisi penerima

$Y_L \angle \theta$ = Admitansi saluran

$Y_R \angle \phi$ = Admitansi beban

Daya aktif pada sisi penerima dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_r = V_R I \cos(\Phi) \quad (2.65)$$

$$P_r = \frac{V_S^2 Y_L^2 Y_R \cos(\phi)}{[Y_L^2 + Y_R^2 + 2Y_L Y_R \cos(\theta - \phi)]} \quad (2.66)$$

Untuk mendapatkan transfer daya maksimum pada bus yaitu dilakukan dengan menggunakan kondisi sebagai berikut :

$$\frac{\partial P_r}{\partial Y_R} = 0 \quad (2.67)$$

Persamaan dicapai dengan memperhatikan kriteria $|Y_L| = |Y_R|$.

Dengan mensubstitusikan $|Y_L| = |Y_R|$ pada persamaan (2.66) maka didapatkan P_{rmax} sebagai berikut :

$$P_{rmax} = \frac{V_S^2 Y_L \cos(\phi)}{2[1 + \cos(\theta - \phi)]} \quad (2.68)$$

Selanjutnya aliran daya untuk sebuah kondisi operasi akan dibandingkan dengan transfer daya maksimum dan batas stabilitas pada saluran didefinisikan dengan rumus sebagai berikut :

$$VSI = \frac{P_r}{P_{rmax}} \quad (2.69)$$

Indeks serupa dapat dikembangkan menggunakan aliran daya reaktif yang dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$VSI = \frac{Q_r}{Q_{rmax}} \quad (2.70)$$

dimana,

$$Q_{rmax} = \frac{V_s^2 Y_L \sin(\phi)}{2[1 + \cos(\theta - \phi)]} \quad (2.71)$$

Keterangan :

P_r = Daya aktif pada sisi penerima

P_{rmax} = Transfer daya maksimum yang disalurkan melalui saluran tanpa adanya ketidakstabilan tegangan

Q_r = Daya reaktif pada sisi penerima

Q_{rmax} = Transfer daya maksimum yang disalurkan melalui saluran tanpa adanya ketidakstabilan tegangan

2.7 Voltage Change Index (VCI) [9]

Voltage Change Index (VCI) didefinisikan sebagai indeks yang digunakan untuk mengukur peningkatan keseluruhan dari profil tegangan bus setelah penempatan UPFC pada lokasi terpilih. *Voltage Change Index* (VCI) didefinisikan dengan rumus sebagai berikut :

$$VCI = \sum_{i=1}^n \frac{V_i^u - V_i^o}{V_i^o}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.72)$$

Keterangan :

V_i^u = Magnitude tegangan pada bus ke- i untuk kasus kontingensi dengan penambahan UPFC pada sistem

V_i^o = Magnitude tegangan pada bus ke- i untuk kasus kontingensi tanpa penambahan UPFC pada sistem

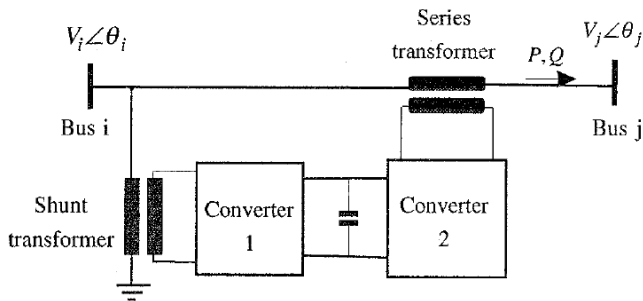
n = Nomor bus

Nilai dari VCI merupakan sebuah angka, dimana mencatat peningkatan dari magnitude tegangan bus. Nilai tertinggi dari VCI

menunjukkan bahwa pada sebuah sistem tenaga listrik sebagian besar tegangan bus mengalami kenaikan dan karena itu sistem beroperasi pada level keamanan yang lebih baik. Oleh karena itu, indeks ini digunakan sebagai penempatan akhir dari UPFC setelah pencarian awal dengan VSI.

2.8 Unified Power Flow Controller (UPFC) [11, 12, 13, 14]

Unified Power Flow Controller (UPFC) merupakan salah satu jenis peralatan FACTS devices yang diusulkan oleh Gyugyi. UPFC didefinisikan sebagai salah satu peralatan FACTS devices yang paling kompleks dan serbaguna dikarenakan dapat mengontrol ketiga parameter pada sistem transmisi yaitu impedansi saluran, magnitude tegangan dan perbedaan sudut fasa antara tegangan pada sisi kirim maupun sisi terima. UPFC memiliki dua konverter sumber tegangan (*Voltage Source Converter*) dimana satu konverter terhubung shunt dengan saluran transmisi melalui transformator shunt, sedangkan konverter yang lain terhubung seri melalui tranformator seri. Kapasitor DC terhubung paralel antara kedua konverter. Gambar 2.9 merupakan rangkaian dasar dari UPFC.



Gambar 2.9 Rangkaian Dasar UPFC [12, 13]

Pada gambar 2.9 diketahui bahwa terdapat dua konverter yaitu konverter 1 dan konverter 2. Konverter 2 berfungsi sebagai sumber tegangan AC yang menginjeikkan tegangan dengan magnitude terkontrol ($0 \leq V_T \leq V_{Tmax}$) dan sudut fasa ($0 \leq \phi_T \leq \pi_T$) yang terhubung seri dengan saluran transmisi melalui transformator seri. Selain itu konverter 2 dapat menginjeksi atau menyerap daya reaktif dan mengubah daya aktif

sebagai hasil dari tegangan injeksi seri. Konverter 1 berfungsi untuk mensuplai ataupun menyerap daya aktif yang dibutuhkan oleh konverter 2 pada *DC link* kapasitor. Disamping itu konverter 1 juga berfungsi untuk menyuplai atau menyerap daya reaktif dan menyediakan kompensasi reaktif shunt untuk saluran.

2.8.1 Pemodelan UPFC

Berdasarkan referensi [9] dan [13], UPFC dimodelkan sebagai sumber daya aktif dan daya reaktif yang statis. Konverter 1 digunakan terutama untuk menyediakan daya aktif yang diinjeksikan ke jaringan transmisi melalui konverter 2. Dari pernyataan sebelumnya muncul persamaan sebagai berikut :

$$P_{conv1} = P_{conv2} \quad (2.73)$$

Persamaan diatas menjadi berguna ketika rugi-rugi daya diabaikan. Daya kompleks yang disuplai oleh konverter 2 dirumuskan sebagai berikut :

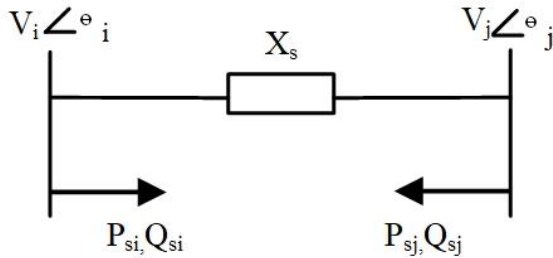
$$S_{conv2} = \bar{V}_s \bar{I}_{ij}^* = r e^{j\gamma} \bar{V}_i \left(\frac{\bar{V}_i^* - \bar{V}_j}{jX_s} \right)^* \quad (2.74)$$

Daya aktif dan daya reaktif yang disuplai oleh konverter 2 dirumuskan sebagai berikut :

$$P_{conv2} = r b_s V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - r b_s V_i^2 \sin \gamma \quad (2.75)$$

$$Q_{conv2} = -r b_s V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) - r b_s V_i^2 \cos \gamma + r^2 b_s V_i^2 \quad (2.76)$$

Daya reaktif yang disuplai ataupun diserap oleh konverter 1 dikendalikan oleh UPFC secara independen dan dimodelkan sebagai sumber reaktif shunt terkontrol dan terpisah. Dari penjelasan diatas, diasumsikan $Q_{conv1} = 0$. Oleh karena itu, model injeksi UPFC tersusun dari model sumber tegangan terhubung seri dengan penambahan daya yang setara dengan $P_{conv1} + j0$ ke bus i . Model injeksi UPFC ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Pemodelan Statis UPFC [9, 13]

Pada gambar 2.9 besar dari injeksi daya aktif dan daya reaktif dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_{si} = r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \quad (2.77)$$

$$Q_{si} = r b_s V_i^2 \cos \gamma \quad (2.78)$$

$$P_{sj} = -r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \quad (2.79)$$

$$Q_{sj} = -r b_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) \quad (2.80)$$

2.9 *Gravitational Search Algorithm (GSA)* [15]

Beberapa dekade belakangan ini, algoritma terus berkembang dan terinspirasi oleh perilaku fenomena alam. Hal tersebut ditunjukkan dari beberapa penelitian yang menunjukkan bahwa algoritma merupakan salah satu metode yang sesuai untuk menyelesaikan masalah komputasi yang kompleks seperti optimasi fungsi objektif, pengenalan pola, tujuan pengendalian, citra pengolahan, pemodelan filter, dan lain sebagainya. Berbagai pendekatan heuristic telah dilakukan dalam berbagai penelitian sejauh ini, terutama GSA (*Gravitational Search Algorithm*).

GSA (*Gravitational Search Algorithm*) merupakan salah satu algoritma berdasarkan hukum gravitasi Newton, dimana berbunyi “Setiap partikel di alam semesta menarik partikel lainnya dengan gaya yang berbanding lurus dengan hasil perkalian massa dari kedua partikel tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak diantara partikel tersebut.

2.9.1 Hukum Gravitasi [15]

Gaya gravitasi menyebabkan kecenderungan massa untuk saling berakselerasi. Hal tersebut merupakan salah satu dari empat interaksi mendasar di alam. Setiap partikel di alam semesta menarik partikel lainnya. Cara gaya gravitasi Newton berperilaku disebut “tindakan dalam jarak”. Gravitasi berperan diantara partikel terpisah tanpa perantara dan tanpa penundaan. Dalam hukum gravitasi Newton, setiap partikel menarik partikel lainnya dengan gaya gravitasi. Gaya gravitasi antara dua partikel berbanding lurus dengan perkalian masa antara dua partikel tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak diantara partikel tersebut. Gaya gravitasi dirumuskan sebagai berikut :

$$F = G \frac{M_1 \cdot M_2}{R^2} \quad (2.81)$$

Keterangan:

F = Besar gaya gravitasi

G = Konstanta gravitasi

M_1 = Massa partikel pertama

M_2 = Massa partikel kedua

R = Jarak antara dua partikel

Hukum kedua Newton mengatakan bahwa ketika sebuah gaya, F , diterapkan pada suatu partikel, maka percepatan, a , partikel tersebut hanya bergantung dari gaya dan massanya.

$$a = \frac{F}{M} \quad (2.82)$$

Berdasarkan persamaan (2.81) dan (2.82), terdapat gaya gravitasi yang menarik antara semua partikel di alam semesta, dimana partikel yang lebih besar dan lebih dekat mempunyai gaya gravitasi yang lebih tinggi. Jarak yang semakin besar diantara dua partikel akan menurunkan gaya gravitasi diantara dua partikel tersebut. Efek dari penurunan gravitasi nilai sebenarnya dari konstanta gravitasi, bergantung pada umur sebenarnya alam semesta. Persamaan (2.83) memberikan penurunan konstanta gravitasi terhadap waktu.

$$G(t) = G(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^\beta, \quad \beta < 1 \quad (2.83)$$

Keterangan :

$G(t)$ = Konstanta gravitasi ketika waktu t

$G(t_0)$ = Nilai konstanta gravitasi ketika pada interval kuantum kosmik pertama dari waktu t_0

Tiga jenis massa didefinisikan dalam fisika teoritis yaitu :

1. Massa gravitasi aktif (M_a), merupakan ukuran dari kekuatan medan gravitasi karena benda tertentu. Medan gravitasi suatu benda dengan massa gravitasi aktif kecil lebih lemah daripada benda dengan massa gravitasi aktif yang lebih besar.
2. Massa gravitasi pasif (M_p), merupakan ukuran kekuatan interaksi suatu benda dengan medan gravitasi. Dalam medan gravitasi yang sama, benda dengan massa gravitasi pasif yang lebih kecil memiliki gaya gravitasi yang lebih kecil daripada benda dengan massa gravitasi pasif yang lebih besar.
3. Massa Inersia (M_i), merupakan perlawanan suatu benda untuk mengubah keadaan gerak saat gaya diterapkan. Sebuah benda dengan massa inersia yang besar mengubah geraknya lebih lambat dan benda dengan massa inersia kecil mengubah geraknya dengan lebih cepat.

Berdasarkan aspek-aspek yang telah disebutkan diatas, persamaan Newton dapat ditulis ulang sebagai berikut.

Gaya gravitasi F_{ij} yang bekerja pada massa i oleh massa j akan sebanding dengan perkalian gravitasi aktif massa j dan gravitasi pasif massa i dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya. Persamaannya dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_{ij} = G \frac{M_{aj} \cdot M_{pi}}{R^2} \quad (2.84)$$

Percepatan massa i sebanding dengan gaya F_{ij} dan berbanding terbalik dengan massa inersia i . Persamaannya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$a_i = \frac{F_{ij}}{M_{ii}} \quad (2.85)$$

Keterangan :

M_{aj} = Massa gravitasi aktif partikel i

M_{pi} = Massa gravitasi pasif partikel j

M_{ii} = Massa inersia partikel i

Meskipun massa inersia, massa gravitasi aktif dan massa gravitasi pasif berbeda secara konseptual, tidak ada percobaan yang pernah menunjukkan perbedaan diantaranya. Teori relativitas umum berpegang pada asumsi bahwa massa gravitasi inersia dan massa gravitasi pasif setara, ini dikenal sebagai prinsip kesetaraan lemah. Teori ini juga mengasumsikan kesetaraan antara massa inersia dan massa gravitasi aktif, yang disebut prinsip ekuivalen kuat.

2.9.2 Algoritma GSA

Pada algoritma GSA ini, agen dianggap sebagai objek dan kinerja dari tiap agen diukur dari massanya. Semua benda saling tarik menarik oleh gaya gravitasi dan gaya ini menyebabkan pergerakan global semua objek ke benda-benda dengan massa yang lebih berat. Oleh karena itu massa bekerja sama menggunakan bentuk komunikasi langsung, melalui gaya gravitasi. Massa yang berat, yang sesuai dengan solusi yang baik, akan bergerak lebih lambat daripada massa yang ringan, hal tersebut menjamin langkah eksploitasi pada algoritma.

Pada algoritma GSA setiap agen (massa) memiliki empat spesifikasi yaitu :

1. Posisi
2. Massa inersia
3. Massa gravitasi aktif
4. Massa gravitasi pasif

Posisi dari massa menunjukkan solusi dari permasalahan dan massa gravitasi serta massa inersia ditentukan dengan menggunakan fungsi fitness. Setiap agen menyajikan sebuah solusi dan algoritma dicari dengan menyesuaikan besar massa gravitasi dan massa inersia dengan benar. Dengan iterasi waktu, massa tertarik pada massa terberat. Massa ini akan menyajikan solusi optimal diruang pencarian.

Hukum gravitasi menyebutkan bahwa setiap partikel menarik setiap partikel lainnya dan gaya gravitasi antara dua partikel tersebut berbanding lurus dengan perkalian massa diantara keduanya dan berbanding terbalik dengan jarak diantara keduanya. Jarak yang

digunakan R bukan R^2 pada semua kasus eksperimental. Menurut hasil dari berbagai penelitian R memberikan solusi yang lebih baik daripada R^2 .

Hukum gerak menyebutkan bahwa laju kecepatan dari setiap massa merupakan jumlah fraksi kecepatan sebelumnya dan percepatan massa tersebut. Percepatan dari massa sama dengan gaya yang dimainkan pada sistem dibagi dengan massa inersianya.

Sebuah sistem dengan N agent, posisi awal setiap agen.

$$X_i = (X_i^1, \dots, X_i^d, \dots, X_i^n) \quad (2.86)$$

Keterangan :

$$\begin{array}{ll} X_i^d & = \text{Posisi masing-masing agen } i \text{ pada dimensi } d \\ i & = 1, 2, \dots, N \end{array}$$

Pada waktu yang spesifik t , gaya yang bekerja pada massa i dari massa j dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \cdot M_{aj}(t)}{R_{ij}(t) + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (2.87)$$

$$R_{ij}(t) = \|x_i(t), x_j(t)\|_2 \quad (2.88)$$

Keterangan :

$$\begin{array}{ll} M_{aj} & = \text{Massa gravitasi aktif agen } j \\ M_{pi} & = \text{Massa gravitasi pasif agen } i \\ G(t) & = \text{Konstanta gravitasi pada waktu } t \\ \varepsilon & = \text{konstanta kecil} \\ R_{ij}(t) & = \text{Jarak Euclidian antara dua agen } i \text{ dan } j \end{array}$$

Total gaya yang bekerja pada agen i dan dimensi d merupakan jumlah komponen d secara acak dari gaya yang diberikan oleh agen lain dan dirumuskan sebagai berikut :

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \text{rand}_j F_{ij}^d(t) \quad (2.89)$$

Keterangan :

rand_j = Nilai acak pada interval 0 – 1

Oleh karena itu berdasarkan hukum gerak, percepatan dari agen i pada waktu t dan pada arah d didasarkan pada persamaan sebagai berikut :

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}^d(t)} \quad (2.90)$$

Keterangan :

M_{ii} = Massa inersia agen i

Kemudian setiap agen akan mengupdate kecepatannya dengan rumusan kecepatan baru yang merupakan penjumlahan dari fraksi kecepatan lama dengan percepatan barunya. Oleh karena itu persamaan kecepatan dan posisi yang baru dirumuskan sebagai berikut :

$$v_i^d(t+1) = \text{rand}_i \cdot v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (2.91)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (2.92)$$

Konstanta gravitasi G diinisiasi pada awalnya dan akan berkurang seiring waktu untuk mengendalikan keakuratan pencarian. Dengan kata lain G adalah fungsi dari nilai awal G_0 dan waktu (t).

$$G(t) = G(G_0, t) \quad (2.93)$$

Massa gravitasi dan massa inersia dihitung dengan evaluasi nilai fitness. Agen yang memiliki massa lebih berat berarti merupakan agen yang lebih efisien. Artinya agen yang lebih baik memiliki daya tarik yang lebih tinggi dan berjalan lebih lambat. Dengan mengasumsikan persamaan massa gravitasi dan massa inersia, nilai dari massa dihitung menggunakan mapping dari nilai fitness. Update dari massa gravitasi dan inersia digambarkan dengan persamaan sebagai berikut :

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.94)$$

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (2.95)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (2.96)$$

Keterangan :

$fit_i(t)$ = Nilai fitness dari agen i pada waktu t
 $best(t) - worst(t)$ = Fungsi dari algoritma untuk minimalisasi atau maksimalisasi
 $M_i(t)$ = Massa agen i pada waktu t

Untuk menyelesaikan permasalahan minimalisasi dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$best(t) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (2.97)$$

$$worst(t) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t)$$

Untuk menyelesaikan permasalahan maksimalisasi dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$best(t) = \max_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t) \quad (2.98)$$

$$worst(t) = \min_{j \in \{1, \dots, N\}} fit_j(t)$$

Salah satu cara untuk mengkompromikan eksplorasi dan eksploitasi yang baik yaitu mengurangi jumlah agen seiring meningkatnya jumlah iterasi. Oleh karena itu diusulkan hanya satu set agen dengan massa yang lebih besar yang digunakan untuk mempengaruhi agen yang lain. Hal ini dapat mengurangi kemampuan dari eksplorasi dan meningkatkan kemampuan eksploitasi. Supaya tidak terjebak dalam lokal optimal, algoritma harus memiliki kemampuan eksplorasi di awal. Semakin bertambah jumlah iterasi, kemampuan

eksplorasi semakin berkurang sebaliknya kemampuan eksploitasi semakin meningkat. Untuk meningkatkan kinerja GSA dengan mengontrol eksplorasi dan eksploitasi dilakukan dengan agen K_{best} yang akan mempengaruhi agen lain. K_{best} adalah fungsi waktu dengan nilai awal K_0 diawal dan nilainya menurun seiring berjalannya waktu, K_{best} mengalami penurunan secara linier dan pada akhirnya tersisa satu agen yang menerapkan kekuatannya pada yang lain. Oleh karena itu persamaan (2.89) dapat dimodifikasi menjadi persamaan sebagai berikut :

$$F_i^d(t) = \sum_{j=k_{best}, j \neq i} \text{rand}_j F_{ij}^d(t) \quad (2.99)$$

Keterangan :

K_{best} = Nilai K dimana memiliki nilai kesesuaian terbaik dan massa terbesar

Berikut ini merupakan langkah-langkah dalam algoritma GSA sebagai berikut :

1. Identifikasi ruang pencarian.
2. Inisialisasi secara acak.
3. Evaluasi nilai fitness untuk tiap agen.
4. Update dari $G(t)$, $best(t)$, $worst(t)$ dan $M_i(t)$ untuk $i = 1, 2, \dots, N$.
5. Perhitungan total gaya dalam arah yang berbeda.
6. Perhitungan dari percepatan dan kecepatan.
7. Update posisi agen.
8. Mengulangi langkah 3 sampai 7 hingga kriteria berhenti tercapai.
9. Selesai.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

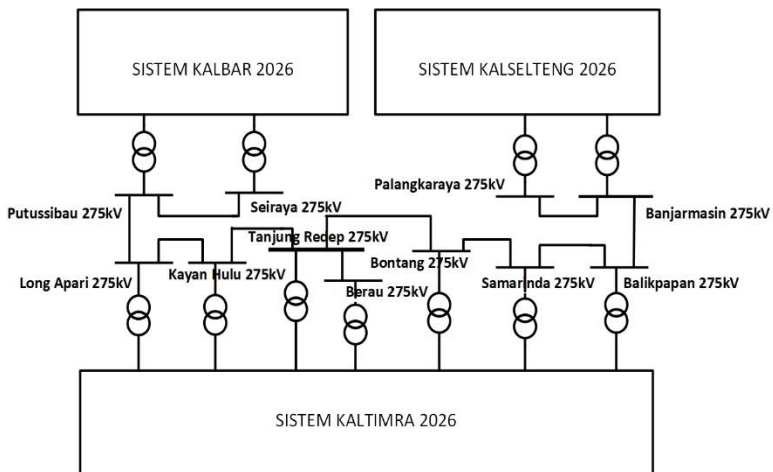
BAB III

PEMODELAN SISTEM TENAGA LISTRIK DAN METODOLOGI PENYELESAIAN

Pada studi ini, FACTS *devices* yaitu UPFC (*Unified Power Flow Controller*) akan dilakukan penempatan pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026. *Voltage Stability Index* (VSI) digunakan untuk menentukan peringkat kontingensi, sedangkan *Voltage Change Index* (VCI) digunakan sebagai penempatan optimal dari UPFC. Algoritma GSA (*Gravitational Search Algorithm*) digunakan sebagai optimasi dari kapasitas UPFC. UPFC yang ditempatkan pada sistem akan memperbaiki stabilitas tegangan dengan mempertimbangkan kontingensi *line outage*.

3.1 Data Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026

Pada studi ini, sistem kelistrikan yang digunakan untuk analisis kestabilan tegangan yaitu sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026. Adapun *Single Line Diagram* dari sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 ditunjukkan pada dibawah ini.



Gambar 3.1 Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026

Untuk *single line diagram* Kalimantan Barat, *single line diagram* Kalimantan Selatan dan Tengah serta *single line diagram* Kalimantan Timur dan Utara terdapat pada lampiran 1. Sistem kelistrikan yang digunakan untuk analisis adalah jalur utara. Sistem transmisi backbone jalur utara merupakan sistem interkoneksi beberapa kota yang terdapat di Kalimantan Barat, Kalimantan Selatan dan Tengah, serta Kalimantan Timur dan Utara. Adapun kota-kota tersebut yaitu :

1. Sei Raya
2. Pontianak (Putussibau)
3. Long Apari
4. Kayan Hulu
5. Tanjung Redep
6. Berau (Sabah)
7. Bontang
8. Samarinda
9. Balikpapan
10. Banjarmasin
11. Palangkaraya

Sistem ini memiliki dua rating tegangan bus, pertama untuk *single line diagram* Kalbar, *single line diagram* Kalselteng dan *single line diagram* Kaltimra menggunakan rating tegangan sebesar 150 kV, sedangkan untuk interkoneksi backbone menggunakan rating tegangan sebesar 275 kV. MVA_{base} yang digunakan untuk analisis adalah 100 MVA. Data pembebanan yang digunakan sebagai analisis kestabilan tegangan dipaparkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Pembebanan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026

No. Bus	Nama Bus	Load		
		MW	MVar	MVA
1	Sambas	57,58	27,8873	63,9778
2	Singkawang	75,06	36,3532	83,4000
3	Senggiring	36	17,4356	40,0000
4	Parit Baru	48,02	23,2572	53,3556

Tabel 3.1 Data Pembebanan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No. Bus	Nama Bus	Load		
		MW	MVar	MVA
5	PLTU Singkawang	0	0	0
6	Bengkayang	0	15,52	7,5167
7	Siantan	85,57	41,4435	95,0778
8	PLTU Kalbar 2-1	0	0	0
9	PLTU Kalbar 2-2	0	0	0
10	Tayan	24,81	12,0160	27,5667
11	Seiraya	163,09	78,9881	181,2111
12	Kotabaru	63,28	30,6479	70,3111
13	Ngabang	14	6,7805	15,5556
14	PLTU Kalbar 3	0	0	0
15	Sandai	7,15	3,4629	7,9444
16	Cemara	57,8	27,9938	64,2222
17	Rassau	25	12,1081	27,7778
18	Sukadana	17,88	8,6597	19,8667
19	Sintang	36,25	17,5567	40,2778
20	Sekadau	17,34	8,3981	19,2667
21	Sanggau	44,18	21,3974	49,0889
22	Ketapang	27,73	13,4303	30,8111
23	Putussibau	15,6	7,5554	17,3333
24	Nanga Pinoh	16,62	8,0494	18,4667
25	Entikong	9,82	4,7560	10,9111
26	Kotabaru 2	8,82	4,2717	9,8000

Tabel 3.1 Data Pembebanan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No. Bus	Nama Bus	Load		
		MW	MVar	MVA
27	Air Upas	25,00	12,1081	27,7778
28	Kendawangan	0	7,04	3,4096
29	Kasongan	30,16	14,607	33,511
30	New Palangkaraya	48,72	23,596	54,133
31	Kuala Kurun	6,27	3,037	6,967
32	Puruk Cahu	8,53	4,131	9,478
33	Muara Teweh	17,16	8,311	19,067
34	Buntok	19,34	9,367	21,489
35	Parenggean	9,34	4,524	10,378
36	Palangkaraya	55,07	26,672	61,189
37	Tanjung	48,65	23,562	54,056
38	Sampit	57,79	27,989	64,211
39	Pulpis	16,13	7,812	17,922
40	PLTUPP	0	0	0
41	Marabahan	11,71	5,671	13,011
42	Amuntai	37,64	18,230	41,822
43	Barikin	45,54	22,056	50,6
44	Selat	41,61	20,153	46,233
45	Kayutangi	23,62	11,440	26,244
46	Tamiang	6,71	3,250	7,456
47	Rantau	51,28	24,836	56,978
48	Paringin	23,27	11,270	25,856

Tabel 3.1 Data Pembebanan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No. Bus	Nama Bus	Load		
		MW	MVar	MVA
49	Kandangan	19,38	9,386	21,533
50	Pangkalan Banteng	9,7	4,698	10,778
51	Sebar	18,03	8,732	20,033
52	Pangkalan Bun	55,72	26,986	61,911
53	Nanga Bulik	7,62	3,691	8,467
54	PLTU Sampit	15,01	7,270	16,678
55	Trisakti 150	119,36	57,809	132,622
56	Cempaka 150	122,12	59,145	135,689
57	Sukamara	5,4	2,615	6
58	Kuala Pambuang	6,26	3,032	6,956
59	Pelaihari	40,78	19,751	45,311
60	Bati-Bati	31,12	15,072	34,578
61	GIS Ulin	99,87	48,369	110,967
62	Asam 12	21,39	10,360	23,767
63	Sei Tabuk	24,79	12,006	27,544
64	Bandara	41,02	19,867	45,578
65	Satui	25,36	12,282	28,178
66	Batu Licin	55,57	26,914	61,744
67	Kotabaru	24,34	11,788	27,044
68	Mantuil	59,85	28,987	66,5
69	Bangkanai	0	0	0
70	Asam 3456	0	0	0

Tabel 3.1 Data Pembebanan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No. Bus	Nama Bus	Load		
		MW	MVar	MVA
71	Kusan	0	0	0
72	KSKT 3	0	0	0
73	PLTGKT	0	0	0
74	KSFTP	0	0	0
75	KSKT 2	0	0	0
76	KSKT 1	0	0	0
77	Bontang Koala	17,10	8,282	19
78	Sangatta	35,40	17,145	39,333
79	PLTU Kaltim FTP	0	0	0
80	Tarakan	0	0	0
81	Juata	0	0	0
82	Sekatak	4,3	2,083	4,778
83	Sepaso	4,01	1,942	4,456
84	Bontang	41,3	20,003	45,889
85	GIS Samarinda	34,9	16,903	38,778
86	Tindang pale	52	25,185	57,778
87	Tanjung Selor	26,84	12,999	29,822
88	Muara Wahau	5,7	2,761	6,333
89	Maloi	5,2	2,518	5,778
90	GI New Samarinda	48,3	23,393	53,667
91	Samberah	22,7	10,994	25,222
92	Sambutan	45,7	22,134	50,778

Tabel 3.1 Data Pembebanan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No. Bus	Nama Bus	Load		
		MW	MVar	MVA
93	PLTA Kaltara	0	0	0
94	Malinau	20,13	9,749	22,367
95	GI Lati	7,05	3,414	7,833
96	Tanjung Redep	52	25,185	57,778
97	Muara Bengkal	2,8	1,356	3,111
98	CFK	0	0	0
99	Sanga-Sanga	5	2,422	5,556
100	Nunukan	28,99	14,041	32,211
101	Sebuku	1,22	0,591	1,356
102	Tanjung Batu	1,2	0,581	1,333
103	Taliyasan	2,92	1,414	3,244
104	Embalut	38,3	18,550	42,556
105	Tengkawang	111,5	54,002	123,889
106	Harapan Baru (Haru)	47,6	23,054	52,889
107	Bukuan	30	14,530	33,333
108	Kembang Janggut	2,4	1,162	2,667
109	PLTMG Bangkanai	0	0	0
110	Melak	22,7	10,994	25,222
111	Kota Bangun	8,5	4,117	9,444
112	Bukit Biru	0	0	0
113	Samboja	10,5	5,085	11,667
114	Palaran	0	0	0

Tabel 3.1 Data Pembebanan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No. Bus	Nama Bus	Load		
		MW	MVar	MVA
115	Ujoh Bilang	0	0	0
116	Sepaku	3,1	1,501	3,444
117	Karjo	58,1	28,139	64,556
118	Kuaro	9,5	4,601	10,556
119	Teluk Balikpapan	38	18,404	42,222
120	Senipah	17	8,233	18,889
121	Sei Durian	0	0	0
122	Tanah Grogot	53,3	25,814	59,222
123	Petung	33,6	16,273	37,333
124	New Balikpapan	57,7	27,945	64,111
125	Manggarsari	83,8	40,586	93,111
126	Industri	76,7	37,148	85,222
127	GIS Balikpapan	35,6	17,242	39,556
128	Long Apari	1,05	0,484	1,111
129	Kayan Hulu	1,05	0,509	1,167
130	Berau	300	145,297	333,333
131	Seiraya 275 kV	0	0	0
132	Putussibau 275 kV	0	0	0
133	Long Apari 275 kV	0	0	0
134	Kayan Hulu 275 kV	0	0	0
135	Tanjung Redep 275 kV	0	0	0
136	Berau 275 kV	0	0	0

Tabel 3.1 Data Pembebanan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No. Bus	Nama Bus	Load		
		MW	MVar	MVA
137	Bontang 275 kV	0	0	0
138	Samarinda 275 kV	0	0	0
139	Balikpapan 275 kV	0	0	0
140	Banjarmasin 275 kV	0	0	0
141	Palangkaraya 275 kV	0	0	0
	TOTAL	3765,15	1823,521	4183,445

Pada tabel 3.1 diketahui bahwa terdapat 141 bus beban pada sistem. Jumlah ini sudah termasuk interkoneksi *single line diagram* Kalbar, Kalselteng dan Kaltimra. kV_{base} yang digunakan yaitu 150 kV untuk sistem transmisi 150 kV dan 275 kV untuk backbone 275 kV. penjelasan lebih lengkap mengenai data beban terdapat pada lampiran 1.

Tabel 3.2 merupakan data pembangkitan dari sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 yang akan digunakan untuk analisis kestabilan tegangan.

Tabel 3.2 Data Pembangkitan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026

No. Bus	Nama Bus	Generation			
		MW	MVar	Qmin	Qmax
142	MPP Kalbar-1	20	12,39489	-31,25	31,25
143	MPP Kalbar-2	20	12,39489	-31,25	31,25
144	MPP Kalbar-3	20	12,39489	-31,25	31,25
145	MPP Kalbar-4	20	12,39489	-31,25	31,25
146	PLTU Paritbaru 1-1	30	18,59233	-62,5	62,5
147	PLTU Paritbaru 1-2	30	18,59233	-62,5	62,5

Tabel 3.2 Data Pembangkitan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No. Bus	Nama Bus	Generation			
		MW	MVar	Qmin	Qmax
148	Kalbar Peaker 1-1	20	12,39489	-31,25	31,25
149	Kalbar Peaker 1-2	20	12,39489	-31,25	31,25
150	Kalbar Peaker 1-3	20	12,39489	-31,25	31,25
151	Kalbar Peaker 1-4	20	12,39489	-31,25	31,25
152	PLTU Kalbar 1-1	70	43,38209	-250	250
153	PLTU Kalbar 1-2	70	43,38209	-250	250
154	PLTU Kura-Kura 1-1	27,5	17,04297	-120	120
155	PLTU Kura-Kura 1-2	27,5	17,04297	-120	120
156	Paritbaru 2-1	40	24,78977	-62,5	62,5
157	Paritbaru 2-2	40	24,78977	-62,5	62,5
158	Serawak	90	55,77698	-125	125
159	PLTU Kalbar 2-1	70	43,38209	-125	125
160	PLTU Kalbar 2-2	90	55,77698	-250	250
161	PLTU Kalbar 3-1	90	55,77698	-250	250
162	PLTU Kalbar 3-2	80	49,57954	-125	125
163	KSKT 1-1	80	49,57954	-125	125
164	KSKT 1-2	80	49,57954	-125	125
165	KSKT 3-1	80	49,57954	-125	125
166	KSKT 3-2	80	49,57954	-125	125
167	BKNI-1	70	43,38209	-125	125
168	BKNI-2	35	21,69105	-62,5	62,5
169	BKNI-3	35	21,69105	-62,5	62,5

Tabel 3.2 Data Pembangkitan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No. Bus	Nama Bus	Generation			
		MW	MVar	Qmin	Qmax
170	BKNI-4	35	21,69105	-62,5	62,5
171	BKNI-5	30	18,59233	-62,5	62,5
172	BKNI-6	30	18,59233	-62,5	62,5
173	Pulpis-1	50	30,98722	-85,312	85,312
174	Pulpis-2	50	30,98722	-85,312	85,312
175	PLTU Sampit-1	20	12,39489	-31,25	31,25
176	PLTU Sampit-2	20	12,39489	-31,25	31,25
177	BMPP-1	52	32,2267	-63,5	63,5
178	KSFTP-1	80	49,57954	-125	125
179	KSFTP-2	80	49,57954	-125	125
180	PLTGKT-1	150	92,96164	-250	250
181	PLTGKT-2	150	92,96164	-250	250
182	Riam Kanan	80	49,57954	-250	250
183	Asam-1	50	30,98722	-85,312	85,312
184	Asam-2	50	30,98722	-85,312	85,312
185	Asam-3	50	30,98722	-85,312	85,312
186	Asam-4	50	30,98722	-85,312	85,312
187	PLTA Kusan	52	0	-250	250
188	KSKT 2-1	80	49,57954	-125	125
189	KSKT 2-2	80	49,57954	-125	125
190	Kaltim Peaking-1	80	49,57954	-125	125
191	Kaltim Peaking-2	80	49,57954	-125	125

Tabel 3.2 Data Pembangkitan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

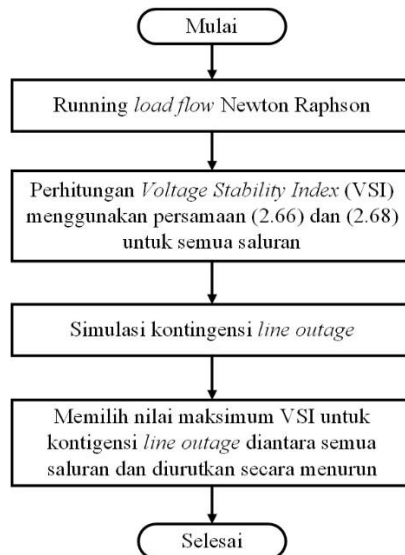
No. Bus	Nama Bus	Generation			
		MW	MVar	Qmin	Qmax
192	PLTU Kaltim FTP-1	80	49,57954	-125	125
193	PLTU Kaltim FTP-2	80	49,57954	-125	125
194	Kaltim 5 MT-1	80	49,57954	-125	125
195	Kaltim 5 MT-2	80	49,57954	-125	125
196	MPP-1	20	12,39489	-30	30
197	MPP-2	20	12,39489	-30	30
198	Cogindo	22,5	13,94425	-60	60
199	Tanjung Batu	15	9,296165	-60	60
200	Kaltim 4-1	80	49,57954	-125	125
201	Kaltim 4-2	80	49,57954	-125	125
202	SMB-1	16	9,915907	-30	30
203	SMB-2	16	9,915907	-30	30
204	Pembangkit Sinar Mas-1	100	61,97443	-250	250
205	Pembangkit Sinar Mas-2	150	92,96164	-250	250
206	GT-1	25	15,49361	-62,5	62,5
207	GT-2	25	15,49361	-62,5	62,5
208	ST	30	18,59233	-62,5	62,5
209	Kaltim Peaker 2-1	120	74,36932	-250	250
210	Kaltim Peaker 2-2	80	49,57954	-125	125
211	PLTU Kaltim MT-1	20	12,39489	-120	120
212	PLTU Kaltim MT-2	20	12,39489	-120	120
213	GT SNP-1	41	25,40952	-65,882	65,882

Tabel 3.2 Data Pembangkitan Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No. Bus	Nama Bus	Generation			
		MW	MVar	Qmin	Qmax
214	GT SNP-2	41	25,40952	-65,882	65,882
215	Senipah Steam	25	15,49361	-62,5	62,5
216	TBPP-1	80	49,57954	-125	125
217	TBPP-2	70	43,38209	-125	125
	TOTAL	4190,5	2564,812	-8177,3	8177,3

3.2 Penentuan Kontingensi dengan *Voltage Stability Index* (VSI)

Berikut merupakan diagram alir dari penentuan peringkat kontingensi menggunakan *Voltage Stability Index* (VSI).



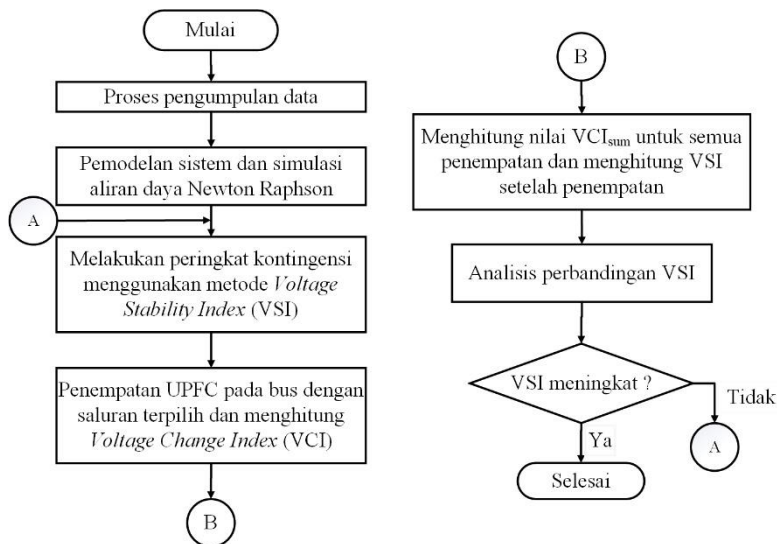
Gambar 3.2 Diagram Alir Penentuan Peringkat Kontingensi *Line Outage* Menggunakan *Voltage Stability Index* (VSI)

Penjelasan dari diagram alir untuk penentuan peringkat kontingensi menggunakan *Voltage Stability Index* (VSI) sebagai berikut :

- Langkah 1 : Melakukan simulasi aliran daya Newton Raphson dari pemodelan yang telah dibuat dengan DigSILENT.
- Langkah 2 : Menghitung nilai *Voltage Stability Index* (VSI) untuk masing-masing saluran. Rumus dari *Voltage Stability Index* (VSI) seperti persamaan (2.66) dan (2.68) pada subbab 2.6.
- Langkah 3 : Melakukan simulasi kontingensi N-1. Kontingensi ini dilakukan satu persatu dan menghitung VSI setiap saluran.
- Langkah 4 : Menentukan nilai maksimum VSI diantara semua saluran untuk kontingensi. Mengurutkan peringkat kontingensi secara menurun.

3.3 Metodologi Simulasi

Berikut ini adalah metodologi simulasi yang dilakukan pada studi ini untuk memperbaiki kestabilan tegangan pada sistem.



Gambar 3.3 Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi

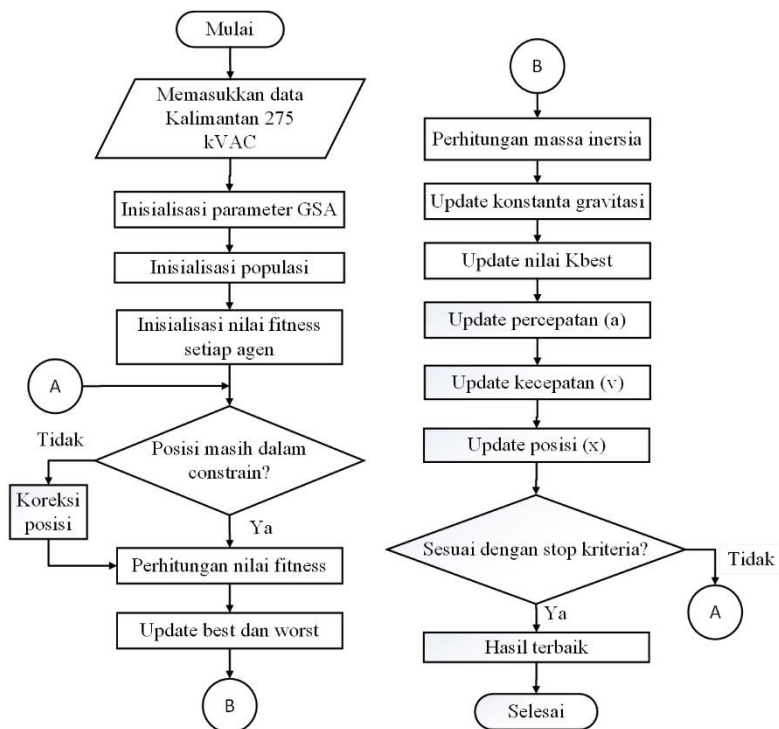
Penjelasan dari diagram alir dari metodologi pelaksanaan studi ini sebagai berikut :

- Langkah 1 : Melakukan pengumpulan data sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan.
- Langkah 2 : Melakukan pemodelan sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan serta simulasi aliran daya Newton Raphson.
- Langkah 3 : Melakukan simulasi kontingensi *line outage* menggunakan metode *Voltage Stability Index* (VSI). Bagian ini sudah dijelaskan secara detail pada diagram alir gambar 3.2.
- Langkah 4 : Saluran dengan nilai VSI tertinggi dengan memperhatikan kontingensi *line outage* dipilih dan diurutkan. Dari hasil tersebut melakukan penempatan UPFC pada saluran terpilih dan menghitung VCI menggunakan persamaan (2.72).
- Langkah 5 : Dari hasil tersebut, kemudian menghitung VCI_{SUM} untuk semua penempatan awal UPFC. Selanjutnya menghitung VSI setelah penempatan akhir UPFC.
- Langkah 6 : Melakukan analisis perbandingan VSI pada langkah 3 dan langkah 5 dan dilihat perbandigannya.
- Langkah 7 : Dari analisis perbandingan VSI tersebut, apabila nilai VSI meningkat, maka penempatan UPFC pada lokasi terpilih merupakan lokasi terbaik berdasarkan pada langkah 5. Sebaliknya apabila VSI tidak meningkat maka diulang kembali pada proses pemodelan sistem dan simulasi aliran daya.

3.4 Optimasi Kapasitas UPFC dengan GSA

Untuk melakukan optimasi dalam penentuan besar kapasitas dari UPFC maka pada studi ini dipilih metode algoritma GSA (*Gravitational Search Algorithm*). GSA (*Gravitational Search Algorithm*) merupakan salah satu jenis kecerdasan buatan yang dapat diaplikasikan pada banyak permasalahan pada sistem tenaga listrik. Algoritma ini terinspirasi dari hukum gravitasi Newton.

Pada studi ini, hasil keluaran dari GSA ini akan menentukan besar kapasitas UPFC yang dimodelkan pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026. Berikut ini merupakan diagram alir dari optimasi kapasitas UPFC dengan algoritma GSA.



Gambar 3.4 Diagram Alir Algoritma GSA

Penjelasan mengenai diagram alir algoritma GSA pada gambar 3.4 sebagai berikut :

- Langkah 1 : Memasukkan data sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan yang sesuai aliran daya Newton Raphson.
- Langkah 2 : Menentukan nilai awal dari parameter GSA yaitu Rpower, Rnorm, alfa, G0(konstanta) dan final_per.
- Langkah 3 : Membangkitkan populasi secara acak, namun masih dalam batas yang telah ditentukan. Pada studi ini, batas yang dipakai yaitu 0,95 sampai 1,05 dan batas nilai VSI yaitu 0,7 sampai 0,9. Hal ini sesuai dengan UPFC yang dimodelkan dengan sumber tegangan yang terpasang pada bus sisi kirim maupun sisi terima.

- Langkah 4 : Nilai fitness sebagai nilai awal yang akan dihitung terlebih dahulu.
- Langkah 5 : Tahap ini sebagai awal untuk masuk ke iterasi utama GSA, memastikan bahwa nilai posisi dalam batas yang ditentukan.
- Langkah 6 : Nilai fitness sebagai fungsi objektif yang akan dievaluasi untuk setiap agen pada setiap populasi. Dalam studi ini fungsi fitness dari GSA yaitu memperbaiki stabilitas tegangan.
- Langkah 7 : Melakukan update best dan worst dengan persamaan (2.97) dan (2.98).
- Langkah 8 : Menghitung massa gravitasi (m) dan massa inersia (M) untuk setiap agen menggunakan persamaan (2.95) dan (2.96).
- Langkah 9 : Melakukan update konstanta gravitasi (G) sesuai dengan populasi fitness agen yang terbaik (minimal) dan terburuk (maksimal) menggunakan persamaan sebagai berikut :
- $$G(t) = G_0 \exp\left(-\alpha \frac{t}{T}\right) \quad (3.1)$$
- Keterangan:
 G_0 = nilai awal konstanta gravitasi dipilih secara acak
 α = konstanta
 t = jumlah iterasi
 T = jumlah iterasi total
- Langkah 10 : Tahapan ini dilakukan update K_{best} dengan menggunakan persamaan (2.99).
- Langkah 11 : Tahapan ini dilakukan update percepatan menggunakan persamaan (2.90).
- Langkah 12 : langkah ini dilakukan update kecepatan menggunakan persamaan (2.91).
- Langkah 13 : Pada tahapan ini posisi berikutnya dari agen akan diperbarui menggunakan persamaan (2.92).
- Langkah 14 : Pada langkah ini, langkah 5 sampai dengan langkah 13 akan diulang sampai iterasi mencapai kriteria. Nilai yang dihasilkan merupakan solusi dari masalah optimasi.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB IV

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Pada studi ini akan dijelaskan mengenai hasil simulasi serta analisis dari penempatan dan penentuan kapasitas UPFC pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 untuk memperbaiki kestabilan tegangan dengan kasus kontingensi *line outage*. Simulasi dilakukan untuk membuktikan kesesuaian antara metode yang digunakan dengan pemodelan sistem yang telah dirancang. Pemodelan sistem dilakukan menggunakan software DigSILENT Powerfactory.

Voltage Stability Index (VSI) digunakan untuk menentukan peringkat kontingensi. *Voltage Change Index* (VCI) digunakan untuk penempatan optimal dari UPFC. Saluran dengan nilai VSI tertinggi berdasarkan saluran yang mengalami kontingensi dipilih dan diurutkan. UPFC dipasang pada setiap saluran dan menghitung nilai *Voltage Change Index* (VCI). Kemudian menentukan besar kapasitas UPFC. Kapasitas UPFC dilakukan dengan metode GSA (*Gravitational Search Algorithm*). Dengan penempatan UPFC stabilitas tegangan dapat meningkat dan kembali kepada kondisi normal.

4.1 Data Simulasi

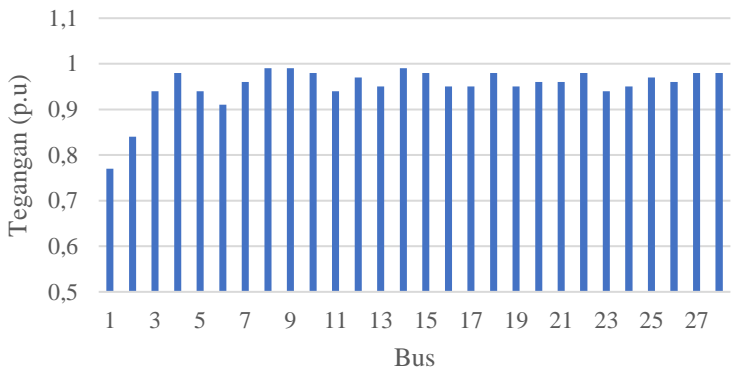
Pada studi ini data simulasi yang digunakan untuk pemodelan sistem tenaga listrik yaitu data sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026. Data parameter tersebut yaitu meliputi data pembangkitan, data pembebanan dan data saluran yang disesuaikan dengan aliran daya pada tahun 2026. Total dari beban yang terpasang yaitu 3765,15 MW dan 1823,52 MVar.

4.2 Simulasi Sistem Tenaga Listrik Sebelum Penempatan UPFC dengan Kasus Kontingensi

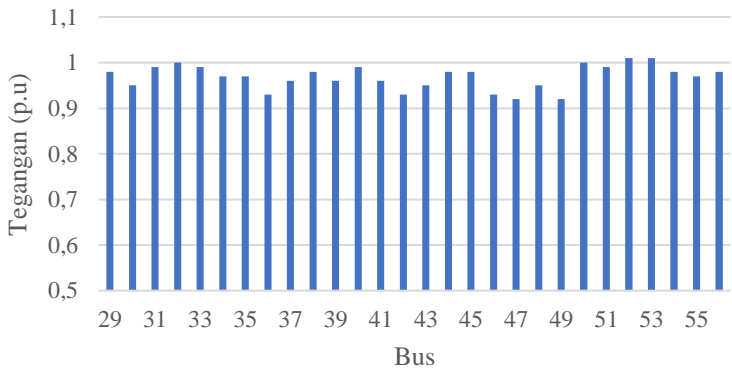
Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai hasil simulasi sistem tenaga listrik sebelum penempatan UPFC dengan kasus kontingensi *line outage*. Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui kondisi awal dari sistem sebelum penempatan UPFC. Kondisi tersebut meliputi tegangan pada setiap bus, besar aliran daya yang mengalir pada setiap saluran dan nilai VSI pada setiap saluran. Setelah itu dilakukan simulasi kontingensi dengan kasus putusnya salah satu saluran.

4.2.1 Simulasi Aliran Daya dan Nilai *Voltage Stability Index* Pada Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026

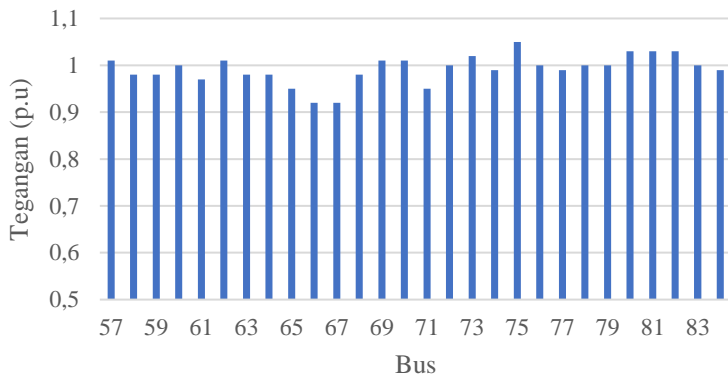
Pada penjelasan di subbab 4.2, kondisi awal sistem sebelum penempatan UPFC salah satunya yaitu besar aliran daya yang mengalir pada setiap saluran. Kemudian dihitung nilai VSI pada setiap saluran dengan menggunakan rumus (2.66) dan (2.68). gambar 4.1 merupakan hasil grafik profil tegangan bus pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 dengan kondisi awal simulasi.



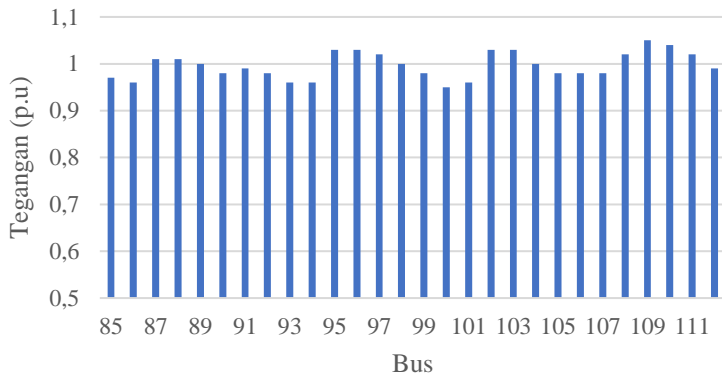
(a)



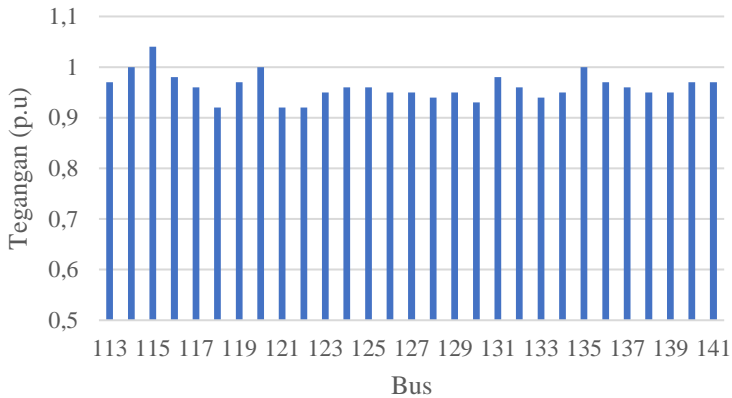
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.1 Grafik Profil Tegangan Sebelum Penempatan UPFC
 (a) bus no. 1-28, (b) bus no. 29-56, (c) bus no. 57-84, (d) bus no. 85-112,
 (e) bus no. 113-141

Berdasarkan gambar 4.1, dapat diketahui bahwa pada kondisi awal tegangan sebelum penempatan UPFC pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 terdapat beberapa bus yang berada pada kondisi tidak normal atau *undervoltage*. Tegangan paling kecil yaitu sebesar 0,77 pu. Hal ini sangat bertentangan dengan standar yang ditetapkan oleh PLN yaitu $1 \pm 5\%$ dari tegangan nominal yaitu 1 p.u.

Tabel 4.1 merupakan hasil aliran daya dan nilai *Voltage Stability Index* (VSI) pada setiap saluran.

Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya dan VSI Setiap Saluran Sebelum Penempatan UPFC

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya		VSI
			MW	MVar	
1	1	2	-57,58	-27,88	0,7170
2	2	5	-102	-18,36	0,2849
3	2	6	-32,96	-42,4	0,6380

Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya dan VSI Setiap Saluran Sebelum Penempatan UPFC (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya		VSI
			MW	MVar	
4	3	4	128,54	-89	0,5021
5	3	5	-164,54	71,56	0,9961
6	4	7	295,1	11,82	0,9905
7	6	13	40,22	-80,76	0,9526
8	7	10	22,68	-22,12	0,1895
9	7	11	108,44	-2,9	0,4362
10	7	12	75,82	-12,32	0,5405
11	8	12	70	40,6	0,9877
12	9	12	90	39	0,9877
13	10	13	-24,72	72,3	0,9178
14	10	15	88,34	-38,4	0,3660
15	10	21	103,22	-16,58	0,5565
16	11	16	-87,9	-7,12	0,7575
17	12	16	146,28	34,44	0,8061
18	12	17	25,02	6,94	0,3820
19	14	10	170	41,06	0,9590
20	15	18	79,3	-23,28	0,9163
21	18	22	60,56	-19,48	0,8003
22	19	20	-30,1	-4,06	0,6804
23	19	23	-31,7	4,96	0,4894
24	19	24	25,56	-18,46	0,7163
25	21	20	47,76	-10,54	0,8490

Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya dan VSI Setiap Saluran Sebelum Penempatan UPFC (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya		VSI
			MW	MVar	
26	21	25	9,84	-17,86	0,4415
27	22	28	32,28	-17,38	0,8345
28	24	26	8,84	-11,36	0,8311
29	28	27	25,08	-4,44	0,8208
30	29	31	-20,08	-22,56	0,8317
31	29	35	-69,62	22,15	0,7657
32	29	36	460,42	12,4	0,4830
33	29	38	-83,04	20,25	0,3497
34	30	36	-74,3	9,12	0,0373
35	30	40	25,58	-32,72	0,0315
36	31	32	-26,46	-4,62	0,7040
37	32	33	-35,1	-8,54	0,8134
38	33	34	178,76	-6,16	0,4574
39	34	37	154,68	-20,34	0,8294
40	35	38	-80,02	18,22	0,6677
41	36	39	62,75	-21,7	0,4691
42	36	40	27,53	-32,46	0,4848
43	37	43	129,31	3,34	0,5070
44	37	48	130,24	3,71	0,5204
45	38	50	-101,87	19,98	0,7035
46	38	52	-103,61	19,48	0,0623
47	38	54	21,34	-8,62	0,8068

Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya dan VSI Setiap Saluran Sebelum Penempatan UPFC (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya		VSI
			MW	MVar	
48	39	44	44,5	-31,83	0,9519
49	40	44	151,29	-4,51	0,6885
50	41	43	-32,41	13,87	0,0367
51	41	45	20,7	-19,54	0,8349
52	42	46	6,72	0,86	0,9810
53	43	42	44,62	15,54	0,1592
54	43	48	-104,08	17,02	0,9996
55	43	49	40,98	12,35	0,0717
56	43	56	12,4	-17,95	0,0136
57	43	45	54,07	-34,12	0,0367
58	44	51	149,7	-67,64	0,8008
59	45	51	61,72	-74,1	0,6813
60	45	63	-12,16	20,76	0,8334
61	47	49	-21,09	-3,91	0,9997
62	50	52	-117,31	5,78	0,7334
63	51	55	-23,6	98,7	0,1837
64	52	53	8,42	-2,44	0,5760
65	52	57	4,61	-4,3	0,1836
66	53	57	0,79	-2,89	0,8843
67	54	58	6,26	-10,96	0,8272
68	55	61	-35,88	37,3	0,9306
69	55	68	-107,52	3,98	0,6260

Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya dan VSI Setiap Saluran Sebelum Penempatan UPFC (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya		VSI
			MW	MVar	
70	56	61	136,74	8,2	0,5378
71	56	64	137,86	6,46	0,9273
72	56	59	-9,34	4,67	0,9294
73	56	60	-34,82	-6,84	0,2467
74	59	62	-50,14	-13,1	0,2468
75	60	62	-66,35	-18,63	0,9465
76	62	70	-38,73	-37,45	0,9996
77	63	68	-36,96	11,32	0,5257
78	64	68	96,54	-12,94	0,7644
79	65	70	-106,5	-45,6	0,0641
80	65	66	81,14	33,32	0,9117
81	66	67	24,42	8,06	0,8920
82	69	33	235	-6,74	0,7201
83	70	68	110,1	11,31	0,0357
84	71	47	30,66	19,17	0,7334
85	71	56	21,34	-19,8	0,4036
86	72	29	160	25,98	0,9071
87	73	52	300	15,32	0,9822
88	74	37	160	51,58	0,9170
89	75	70	160	95,38	0,9601
90	76	29	160	18,1	0,9071
91	77	78	39,82	-32,12	0,2754

Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya dan VSI Setiap Saluran Sebelum Penempatan UPFC (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya		VSI
			MW	MVar	
92	77	84	103,08	72,34	0,9900
93	78	83	9,22	-10,1	0,6541
94	78	88	-4,94	-32,08	0,7576
95	79	84	160	25,2	0,9883
96	80	81	0	0	0,9826
97	81	82	0	-2,74	0,9739
98	82	87	-4,31	12,3	0,4753
99	83	89	5,2	-2,96	0,9258
100	84	91	76,66	-9,1	0,1634
101	85	90	-88,44	-102,3	0,7242
102	86	87	-102,67	-14,3	0,4753
103	86	94	50,68	-10,88	0,9946
104	87	96	-137,3	-11,38	0,3112
105	88	96	122,22	-63,54	0,4021
106	88	97	27,1	-31,56	0,4021
107	90	91	-29,94	-16,6	0,8248
108	90	104	-107,2	-108,24	0,2101
109	91	92	55,52	-5,94	0,4592
110	92	99	9,6	-20,2	0,9982
111	93	94	0	0	0,5773
112	94	101	30,44	-9,82	0,3621
113	95	96	-8,26	-0,12	0,6812

Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya dan VSI Setiap Saluran Sebelum Penempatan UPFC (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya		VSI
			MW	MVar	
114	95	102	1,2	-3,3	0,9079
115	96	103	2,92	-5,38	0,6127
116	97	108	24,1	-11,28	0,8797
117	98	104	37,5	13,04	0,9997
118	99	107	4,6	-22	0,8460
119	100	101	-28,98	-14,04	0,8059
120	104	105	225,54	79,74	0,2327
121	104	112	106,28	-21,8	0,1317
122	105	106	112,72	22,88	0,9383
123	106	107	-20,18	-24,02	0,0042
124	106	113	85,14	24,6	0,4351
125	107	114	-35,47	-39,65	0,8780
126	107	120	-10,17	-18,9	0,5237
127	108	111	21,62	6,12	0,9880
128	109	110	0	0	0,0036
129	110	111	-22,72	23,64	0,2561
130	110	115	0	-14,84	0,7836
131	111	112	-9,96	53,76	0,4862
132	112	116	95,34	42,1	0,7137
133	113	117	74,28	23,22	0,7544
134	114	120	4,37	-5,33	0,6434
135	116	119	91,66	44,36	0,9011

Tabel 4.1 Hasil Aliran Daya dan VSI Setiap Saluran Sebelum Penempatan UPFC (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya		VSI
			MW	MVar	
136	117	125	15,76	0,9	0,9466
137	118	121	0	-10,88	0,3812
138	118	122	53,4	23,76	0,9637
139	118	123	-68,5	-20,2	0,5877
140	119	123	104,28	27,5	0,4116
141	119	124	98,98	90,38	0,7234
142	120	125	84,14	40,46	0,3392
143	124	125	-14,8	-16,52	0,9869
144	124	126	76,82	36,92	0,9994
145	124	127	-20,9	43,04	0,8279
146	131	132	32,08	-76,26	0,5916
147	132	133	-15,7	8,6	0,7815
148	133	134	-16,8	-53,4	0,9557
149	134	135	-17,88	-138,68	0,6730
150	135	136	303,64	-104,8	0,6730
151	135	137	-155,32	6,88	0,7002
152	137	138	26,92	47,46	0,9666
153	138	139	80,32	-9,8	0,8384
154	139	140	23,6	-118,06	0,4957
155	140	141	-216,38	-10,54	0,7288
TOTAL			4681,51	-545,81	

Pada tabel 4.1 dapat dilihat bahwa total aliran daya sebelum penempatan UPFC pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 yaitu daya aktif sebesar 4681,51 MW dan daya reaktif sebesar - 545,81 MVar.

4.2.2 Analisis Kontingensi Pada Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026

Seperti yang telah dijelaskan pada subbab 2.4, kontingensi merupakan kejadian yang disebabkan oleh kegagalan atau pelepasan dari satu atau lebih saluran transmisi dan atau generator. Kontingensi N-1 adalah kontingensi yang dihasilkan dari terlepasnya satu komponen, sedangkan kontingensi N-k adalah kontingensi yang dihasilkan dari terlepasnya sejumlah k komponen.

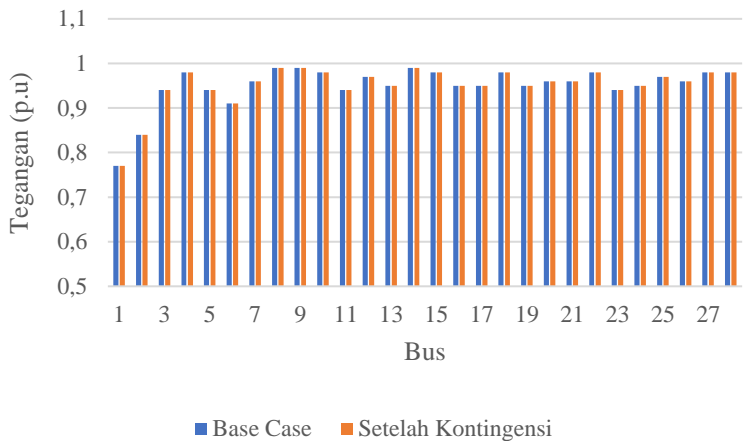
Pada studi ini dilakukan analisis kontingensi dengan kasus *line outage*. Simulasi dilakukan dengan melihat pembebanan pada saluran diatas 80%. Tabel 4.2 merupakan hasil simulasi kontingensi dengan kapasitas saluran diatas 80%.

Tabel 4.2 Hasil Simulasi Kontingensi dengan Kapasitas Saluran Diatas 80%

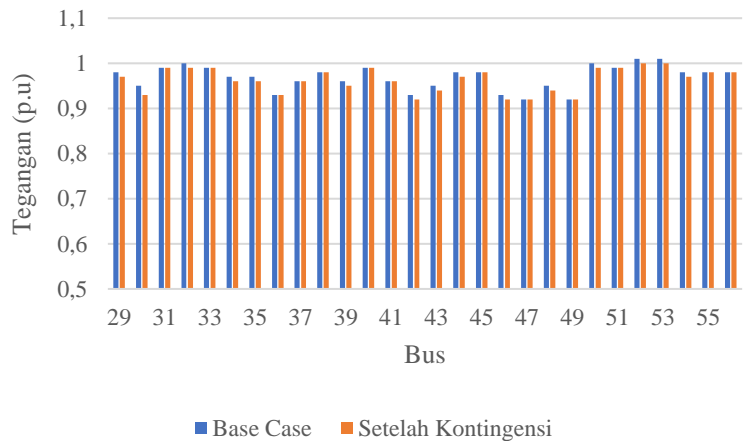
No	Line	Kontingensi		Loading (%)	VSI
		Dari Bus	Ke Bus		
1	32	Kasongan	Palangkaraya	139,0	0,48305
2	41	Palangkaraya	Pulpis	107,3	0,68852
3	33	Kasongan	Sampit	125,7	0,66768
4	43	Tanjung	Barikin	80,8	0,50698
5	79	Satui	Asam-3456	80,5	0,06407
6	4	Senggiring	Parit Baru	82,8	0,50215
7	44	Tanjung	Paringin	80,7	0,52037

Pada tabel 4.2 diketahui bahwa terdapat 7 saluran yang memiliki kapasitas diatas 80%. Kondisi ini dipilih untuk dilakukan analisis penempatan UPFC, dimana 3 saluran berada dalam kondisi *very critical*

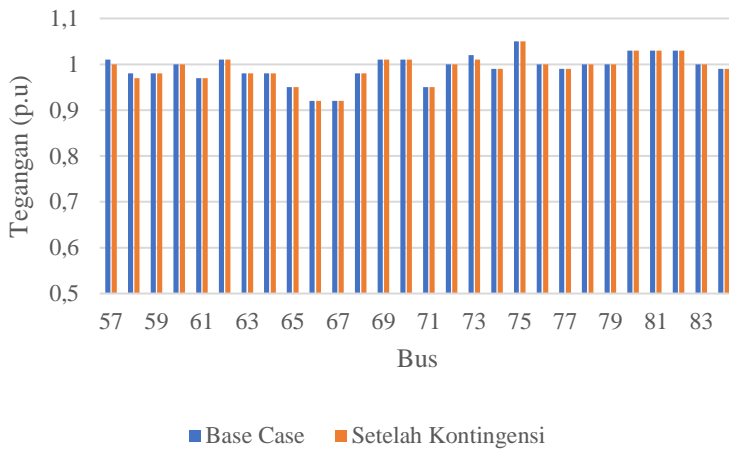
dan 4 saluran dalam kondisi *less critical*. Pembebanan paling besar terjadi pada saluran 32 yang menghubungkan bus Kasongan dan Palangkaraya dengan nilai sebesar 139% serta nilai VSI yaitu sebesar 0,48305. Nilai VSI yang telah dihitung pada tabel 4.1 dimasukkan pada tabel 4.2.



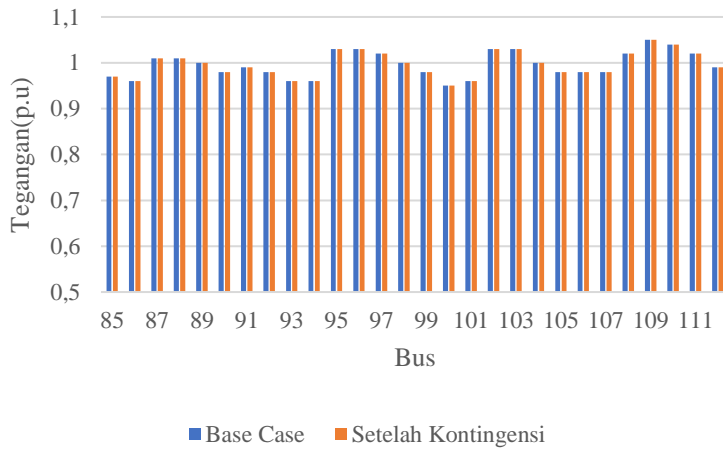
(a)



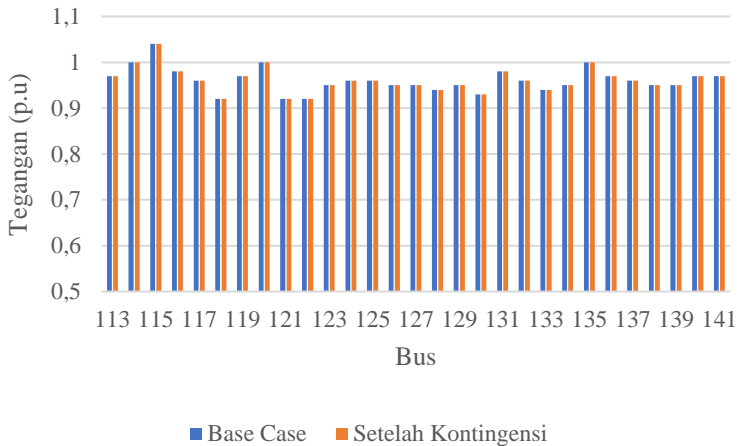
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.2 Grafik Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Kontingensi pada Saluran 29-36 (a) bus no. 1-28, (b) bus no. 29-56, (c) bus no. 57-84, (d) bus no. 85-112, (e) bus no. 113-141

Pada gambar 4.2 diketahui bahwa ketika terjadi putus saluran pada sistem menyebabkan profil tegangan bus mengalami penurunan. Penurunan terjadi pada sebagian besar pada bus sistem terutama pada bus yang berdekatan dengan saluran 32 yang menghubungkan bus Kasongan dan bus Palangkaraya.

4.3 Penempatan UPFC dengan Metode *Voltage Stability Index* (VSI) dan *Voltage Change Index* (VCI)

Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai penempatan UPFC menggunakan metode VSI dan VCI. Berdasarkan pembahasan subbab 4.2.2, 7 saluran dipilih untuk dilakukan penempatan UPFC, dimana 3 saluran dalam kondisi *very critical* dan 4 saluran dalam kondisi *less critical*. UPFC dipasang satu persatu sesuai dengan kontingensi yang dipilih kemudian dihitung nilai VCI sebagai penempatan optimal dari UPFC. Tabel 4.3 merupakan hasil penempatan UPFC menggunakan *Voltage Change Index* (VCI).

Tabel 4.3 Nilai VCI untuk Penempatan Optimal UPFC

Kontingensi	UPFC Terpasang pada			
	Kasongan-Palangkaraya	PLTUPP-Selat	Sampit-Parenggean	Tanjung-Paringin
Kasongan-Palangkaraya	-0,00717	0,00613	0,00000	0,00000
Palangkaraya-Pulpis	0,02891	0,00420	0,00105	0,00000
Kasongan-Sampit	-0,00513	-0,04984	-0,00204	0,00102
Tanjung-Barikin	0,00209	0,00416	0,00104	0,00414
Satui-Asam-3456	0,00000	-0,00099	0,00099	0,00099
Senggiring-Paritbaru	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Tanjung-Paringin	0,00209	0,00416	0,00104	0,00414
VCI_{SUM}	0,02078	-0,03020	0,00616	0,01030

Tabel 4.3 Nilai VCI untuk Penempatan Optimal UPFC (Lanjutan)

Kontingensi	UPFC Terpasang pada		
	Satui-Asam-3456	Senggiring-Paritbaru	Tanjung-Paringin
Kasongan-Palangkaraya	0,00102	0,00102	0,00000
Palangkaraya-Pulpis	0,00105	0,00105	0,00000
Kasongan-Sampit	0,00000	0,00000	0,00102
Tanjung-Barikin	0,00518	0,00104	0,00104
Satui-Asam-3456	0,00099	0,00099	0,00100
Senggiring-Paritbaru	0,00000	0,00000	0,00000
Tanjung-Paringin	0,00518	0,00104	0,00104
VCI_{SUM}	0,01343	0,00514	0,00409

Pada tabel 4.3 dapat diketahui bahwa nilai VCI tertinggi berada pada saluran 32 yang menghubungkan bus Kasongan-Palangkaraya yaitu sebesar 0,02078. Hal ini mengindikasikan bahwa penempatan UPFC paling optimal berada pada kedua bus tersebut. Berdasarkan referensi [9], nilai VCI tertinggi merupakan penempatan paling optimal dari UPFC. Setelah penempatan UPFC profil tegangan keseluruhan pada sistem mengalami peningkatan untuk semua kemungkinan kontingensi. Dari hasil diatas dapat diketahui juga bahwa terdapat nilai total VCI bertanda negatif yaitu pada bus PLTUPP-Selat yaitu sebesar -0,0302. Berdasarkan referensi [9], pemasangan UPFC pada saluran tersebut mengakibatkan VSI bernilai negatif untuk semua kemungkinan kontingensi, dimana mengindikasikan penurunan profil tegangan pada sistem.

4.4 Analisis Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC dengan Metode *Voltage Change Index* (VCI)

Pada subbab ini akan dijelaskan hasil aliran daya setelah penempatan UPFC berdasarkan perhitungan VCI sesuai dengan tabel 4.3. Penempatan UPFC dilakukan satu per satu dan menghitung perubahan tegangan setiap bus yang salurannya mengalami kontingensi dengan persamaan (2.72). Tabel 4.4 menunjukkan hasil aliran daya setelah penempatan UPFC dengan perhitungann VCI.

Tabel 4.4 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Metode VCI

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
1	1	2	-57,58	-57,58	1,15562	1,1556
2	2	5	-102	-102	3,44662	3,44655
3	2	6	-32,96	-32,96	0,64655	0,64656
4	3	4	128,54	128,54	2,70807	2,70829
5	3	5	-164,54	-164,54	0,78945	0,7895
6	4	7	295,1	295,1	1,29702	1,2969
7	6	13	40,22	40,22	0,51202	0,512

Tabel 4.4 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Metode VCI (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
8	7	10	22,68	22,66	0,10031	0,10028
9	7	11	108,44	108,44	0,5865	0,58651
10	7	12	75,82	75,82	0,17496	0,17495
11	8	12	70	70	0,35868	0,35857
12	9	12	90	90	0,52345	0,52334
13	10	13	-24,72	-24,72	0,24743	0,24746
14	10	15	88,34	88,34	0,94014	0,94014
15	10	21	103,22	103,22	0,71728	0,71727
16	11	16	-87,9	-87,9	0,1195	0,11952
17	12	16	146,28	146,28	0,17201	0,17199
18	12	17	25,02	25,02	0,01004	0,01004
19	14	10	170	170	0,41142	0,41138
20	15	18	79,3	79,3	0,42851	0,4285
21	18	22	60,56	60,56	0,27632	0,27632
22	19	20	-30,1	-30,1	0,06285	0,06285
23	19	23	-31,7	-31,7	0,15103	0,15094
24	19	24	25,56	25,56	0,05239	0,05238
25	21	20	47,76	47,76	0,08733	0,08733
26	21	25	9,84	9,84	0,01368	0,01368
27	22	28	32,28	32,28	0,07811	0,0781
28	24	26	8,84	8,84	0,00614	0,00614
29	28	27	25,08	25,08	0,04491	0,04491

Tabel 4.4 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Metode VCI (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
30	29	31	-20,08	8,6	0,07777	0,05519
31	29	35	-69,62	-69,6	1,0635	1,06831
32	29	36	460,42	377,41	37,60642	30,37817
33	29	38	-83,04	-82,91	2,08032	2,09126
34	30	36	-74,3	-68,41	0,03157	0,02916
35	30	40	25,58	19,69	1,09526	0,60031
36	31	32	-26,46	2,22	0,01604	0,00408
37	32	33	-35,1	-6,32	0,00138	0,00147
38	33	34	178,76	207,58	3,61611	3,23453
39	34	37	154,68	181,78	3,50134	3,09572
40	35	38	-80,02	-80,01	1,23265	1,24026
41	36	39	62,75	55,56	1,77542	1,61973
42	36	40	27,53	21,37	1,04393	0,57657
43	37	43	129,31	141,89	3,76929	3,49829
44	37	48	130,24	142,83	3,69121	3,42708
45	38	50	-101,87	-101,82	5,76141	5,78249
46	38	52	-103,61	-103,56	7,66452	7,69028
47	38	54	21,34	21,34	0,03108	0,03129
48	39	44	44,5	37,81	0,55676	0,45586
49	40	44	151,29	139,88	3,14876	3,26953
50	41	43	-32,41	-37,36	0,71367	0,64115
51	41	45	20,7	25,65	0,38429	0,33213

Tabel 4.4 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Metode VCI (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
52	42	46	6,72	6,72	0,00062	0,00062
53	43	42	44,62	44,62	0,13846	0,13754
54	43	48	-104,08	-116,04	0,09898	0,09069
55	43	49	40,98	45,22	0,63189	0,59272
56	43	56	12,4	16,75	0,75616	0,65534
57	43	45	54,07	64,29	2,14277	1,89352
58	44	51	149,7	132,36	0,87912	0,89525
59	45	51	61,72	65,34	0,26886	0,23978
60	45	63	-12,16	-1,24	0,00363	0,00343
61	47	49	-21,09	-25,24	0,0049	0,00436
62	50	52	-117,31	-117,3	1,91635	1,92104
63	51	55	-23,6	-14,56	0,21413	0,19625
64	52	53	8,42	8,42	0,00703	0,00704
65	52	57	4,61	4,61	0,00438	0,00439
66	53	57	0,79	0,79	0,00022	0,00022
67	54	58	6,26	6,26	0,00033	0,00033
68	55	61	-35,88	-28,68	0,04093	0,00377
69	55	68	-107,52	-105,62	0,12156	0,11831
70	56	61	136,74	129,44	0,40216	0,40291
71	56	64	137,86	126,32	0,13175	0,13307
72	56	59	-9,34	-10,02	0,01826	0,01956
73	56	60	-34,82	-35,54	0,04406	0,43508

Tabel 4.4 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Metode VCI (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
74	59	62	-50,14	-50,82	0,70947	0,70087
75	60	62	-66,35	-67,1	0,16744	0,16581
76	62	70	-38,73	-40,18	0,01569	0,01552
77	63	68	-36,96	-26,04	0,00735	0,00835
78	64	68	96,54	85,04	0,08087	0,08108
79	65	70	-106,5	-106,5	1,4643	1,46278
80	65	66	81,14	81,14	0,57321	0,57262
81	66	67	24,42	24,42	0,0434	0,04336
82	69	33	235	235	1,96496	1,96327
83	70	68	110,1	108,66	0,8888	0,88555
84	71	47	30,66	26,47	0,41618	0,43232
85	71	56	21,34	25,53	0,93985	0,84875
86	72	29	160	160	0,80841	0,85501
87	73	52	300	300	0,38654	0,38768
88	74	37	160	160	1,13668	1,10657
89	75	70	160	160	0,86412	0,86353
90	76	29	160	160	0,71951	0,75594
91	77	78	39,82	39,82	0,07428	0,07399
92	77	84	103,08	103,08	0,05825	0,05776
93	78	83	9,22	9,22	0,00417	0,00417
94	78	88	-4,94	-4,96	0,00283	0,02807
95	79	84	160	160	0,28574	0,28535

Tabel 4.4 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Metode VCI (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
96	80	81	0	0	0,00002	0,00002
97	81	82	0	0	0,00298	0,00298
98	82	87	-4,31	-4,31	0,08724	0,08725
99	83	89	5,2	5,2	0,00058	0,00417
100	84	91	76,66	76,64	0,23743	0,23722
101	85	90	-88,44	-88,46	0,20752	0,20421
102	86	87	-102,67	-102,67	3,40505	3,40442
103	86	94	50,68	50,68	0,0539	0,05389
104	87	96	-137,3	-137,3	1,06172	1,06156
105	88	96	122,22	122,2	1,50145	1,50081
106	88	97	27,1	27,1	0,09742	0,09796
107	90	91	-29,94	-29,94	0,00512	0,00507
108	90	104	-107,2	-107,24	0,08414	0,08326
109	91	92	55,52	55,52	0,11401	0,11386
110	92	99	9,6	9,58	0,00131	0,0013
111	93	94	0	0	0,00012	0,00012
112	94	101	30,44	30,44	0,05527	0,05526
113	95	96	-8,26	-8,26	0,00154	0,00154
114	95	102	1,2	1,2	0,00004	0,00004
115	96	103	2,92	2,92	0,00029	0,00029
116	97	108	24,1	24,1	0,04041	0,04045
117	98	104	37,5	37,5	0,00344	0,00341

Tabel 4.4 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Metode VCI (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
118	99	107	4,6	4,58	0,00132	0,00131
119	100	101	-28,98	-28,98	0,05609	0,05608
120	104	105	225,54	225,52	0,65835	0,6569
121	104	112	106,28	106,28	0,3463	0,3471
122	105	106	112,72	112,7	0,082	0,08175
123	106	107	-20,18	-20,2	0,01708	0,01693
124	106	113	85,14	85,14	0,18233	0,1812
125	107	114	-35,47	-35,47	0,16513	0,16332
126	107	120	-10,17	-10,17	0,06069	0,06144
127	108	111	21,62	21,62	0,00741	0,00738
128	109	110	0	0	0,00655	0,00656
129	110	111	-22,72	-22,72	0,16703	0,16711
130	110	115	0	0	0,00275	0,00275
131	111	112	-9,96	-9,96	0,15224	0,15161
132	112	116	95,34	95,32	0,28516	0,28267
133	113	117	74,28	74,26	0,21523	0,21358
134	114	120	4,37	4,37	0,00315	0,00347
135	116	119	91,66	91,66	0,19922	0,19732
136	117	125	15,76	15,74	0,00429	0,0042
137	118	121	0	0	0,00175	0,00176
138	118	122	53,4	53,4	0,0471	0,04702
139	118	123	-68,5	-68,5	0,68421	0,68296

Tabel 4.4 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Metode VCI (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
140	119	123	104,28	104,28	0,411	0,41028
141	119	124	98,98	98,98	0,08672	0,08586
142	120	125	84,14	84,12	0,63956	0,63513
143	124	125	-14,8	-14,78	0,01034	0,00952
144	124	126	76,82	76,82	0,05721	0,05711
145	124	127	-20,9	-20,94	0,01948	0,0181
146	131	132	32,08	32,08	0,0949	0,09474
147	132	133	-15,7	-15,7	0,04827	0,04812
148	133	134	-16,8	-16,8	0,01599	0,01606
149	134	135	-17,88	-17,88	0,19422	0,19471
150	135	136	303,64	303,64	3,65404	3,6522
151	135	137	-155,32	-155,34	1,10298	1,1002
152	137	138	26,92	26,92	0,06486	0,06206
153	138	139	80,32	80,36	0,0889	0,08783
154	139	140	23,6	23,62	0,06331	0,07919
155	140	141	-216,38	-188,08	0,90786	0,86723
TOTAL			4681,51	4755,45	132,6106	122,343

Pada tabel 4.4 diketahui bahwa aliran daya setelah penempatan UPFC lebih besar dibandingkan sebelum penempatan UPFC yaitu sebesar 73,94 MW. Rugi-rugi daya aktif setelah penempatan UPFC yaitu 122,3432 MW berkurang dibandingkan sebelum penempatan UPFC yaitu 132,6106 MW. Penurunan total rugi-rugi daya pada sistem telah meningkatkan kapabilitas transfer daya dimana pembebanan pada saluran menurun. Sebagian besar saluran mengalami kenaikan daya yang cukup

signifikan walaupun terdapat beberapa saluran yang mengalami penurunan daya. Tabel 4.5 menunjukkan penurunan pembebanan pada saluran setelah pemasangan UPFC.

Tabel 4.5 Penurunan Pembebanan pada Saluran Setelah Penempatan UPFC

No	Line	Kontingensi		Loading (%)	VSI
		Dari Bus	Ke Bus		
1	32	Kasongan	Palangkaraya	125	0,496910
2	41	Palangkaraya	Pulpis	82,7	0,542522
3	33	Kasongan	Sampit	114,5	0,426750
4	43	Tanjung	Barikin	72,4	0,613430
5	79	Satui	Asam-3456	63,1	0,040371
6	4	Senggiring	Paritbaru	63,6	0,525720
7	44	Tanjung	Paringin	72,4	0,627370

Pada tabel 4.5 diketahui bahwa dengan penempatan UPFC pada bus Kasongan-palangkaraya telah menurunkan pembebanan saluran pada setiap kontingensi. Penurunan tersebut menyebabkan kenaikan aliran daya seperti yang ditampilkan pada tabel 4.4. Disamping itu penurunan pembebanan tersebut menyebabkan aliran daya dialihkan ke saluran lain yang mengalami kondisi normal. Nilai VSI pada setiap saluran yang mengalami kontingensi juga mengalami kenaikan.

4.5 Analisis Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC dengan Metode Optimasi GSA (*Gravitational Search Algorithm*)

Pada subbab ini dilakukan simulasi penempatan UPFC pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 dengan metode GSA (*Gravitational Search Algorithm*). Dari penempatan UPFC tersebut akan dilihat perubahan tegangan dan aliran daya pada sistem.

Tabel 4.4 merupakan hasil aliran daya setelah penempatan UPFC dengan menggunakan metode GSA (*Gravitational Search Algorithm*).

Tabel 4.6 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Optimasi GSA

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
1	1	2	-57,58	-57,58	1,15562	1,1556
2	2	5	-102	-102	3,44662	3,44655
3	2	6	-32,96	-32,96	0,64655	0,64656
4	3	4	128,54	128,54	2,70807	2,70829
5	3	5	-164,54	-164,54	0,78945	0,7895
6	4	7	295,1	295,1	1,29702	1,2969
7	6	13	40,22	40,22	0,51202	0,512
8	7	10	22,68	22,66	0,10031	0,10028
9	7	11	108,44	108,44	0,5865	0,58651
10	7	12	75,82	75,82	0,17496	0,17495
11	8	12	70	70	0,35868	0,35857
12	9	12	90	90	0,52345	0,52334
13	10	13	-24,72	-24,72	0,24743	0,24746
14	10	15	88,34	88,34	0,94014	0,94014
15	10	21	103,22	103,22	0,71728	0,71727
16	11	16	-87,9	-87,9	0,1195	0,11952
17	12	16	146,28	146,28	0,17201	0,17199
18	12	17	25,02	25,02	0,01004	0,01004
19	14	10	170	170	0,41142	0,41138
20	15	18	79,3	79,3	0,42851	0,4285
21	18	22	60,56	60,56	0,27632	0,27632
22	19	20	-30,1	-30,1	0,06285	0,06285

Tabel 4.6 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Optimasi GSA (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
23	19	23	-31,7	-31,7	0,15103	0,15094
24	19	24	25,56	25,56	0,05239	0,05238
25	21	20	47,76	47,76	0,08733	0,08733
26	21	25	9,84	9,84	0,01368	0,01368
27	22	28	32,28	32,28	0,07811	0,0781
28	24	26	8,84	8,84	0,00614	0,00614
29	28	27	25,08	25,08	0,04491	0,04491
30	29	31	-20,08	9,54	0,07777	0,0567
31	29	35	-69,62	-69,6	1,0635	1,0681
32	29	36	460,42	379,78	37,60642	30,74485
33	29	38	-83,04	-82,91	2,08032	2,0908
34	30	36	-74,3	-68,95	0,03157	0,02961
35	30	40	25,58	20,23	1,09526	0,61354
36	31	32	-26,46	3,16	0,01604	0,00444
37	32	33	-35,1	-5,38	0,00138	0,00109
38	33	34	178,76	208,52	3,61611	3,26476
39	34	37	154,68	182,66	3,50134	3,12771
40	35	38	-80,02	-80,01	1,23265	1,23994
41	36	39	62,75	56,25	1,77542	1,65598
42	36	40	27,53	21,92	1,04393	0,58946
43	37	43	129,31	142,3	3,76929	3,51971
44	37	48	130,24	143,24	3,69121	3,44795

Tabel 4.6 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Optimasi GSA (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
45	38	50	-101,87	-101,82	5,76141	5,78159
46	38	52	-103,61	-103,56	7,66452	7,68917
47	38	54	21,34	21,34	0,03108	0,03128
48	39	44	44,5	38,46	0,55676	0,46784
49	40	44	151,29	140,95	3,14876	3,31985
50	41	43	-32,41	-37,57	0,71367	0,6479
51	41	45	20,7	25,86	0,38429	0,33693
52	42	46	6,72	6,72	0,00062	0,00062
53	43	42	44,62	44,62	0,13846	0,1376
54	43	48	-104,08	-116,43	0,09898	0,09135
55	43	49	40,98	45,29	0,63189	0,59435
56	43	56	12,4	16,75	0,75616	0,661
57	43	45	54,07	64,72	2,14277	1,91662
58	44	51	149,7	134,02	0,87912	0,91637
59	45	51	61,72	66,56	0,26886	0,24482
60	45	63	-12,16	-1,86	0,00363	0,00346
61	47	49	-21,09	-25,31	0,0049	0,00438
62	50	52	-117,31	-117,3	1,91635	1,92083
63	51	55	-23,6	-16,24	0,21413	0,1987
64	52	53	8,42	8,42	0,00703	0,00704
65	52	57	4,61	4,61	0,00438	0,00439
66	53	57	0,79	0,79	0,00022	0,00022

Tabel 4.6 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Optimasi GSA (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
67	54	58	6,26	6,26	0,0033	0,0033
68	55	61	-35,88	-29,84	0,04093	0,03894
69	55	68	-107,52	-106,36	0,12156	0,12001
70	56	61	136,74	130,4	0,40216	0,40881
71	56	64	137,86	127,56	0,13175	0,13566
72	56	59	-9,34	-9,95	0,01826	0,01931
73	56	60	-34,82	-35,47	0,04406	0,43328
74	59	62	-50,14	-50,75	0,70947	0,69908
75	60	62	-66,35	-67,02	0,16744	0,16547
76	62	70	-38,73	-40,03	0,01569	0,01546
77	63	68	-36,96	-26,66	0,00735	0,00872
78	64	68	96,54	86,28	0,08087	0,08344
79	65	70	-106,5	-106,5	1,4643	1,4628
80	65	66	81,14	81,14	0,57321	0,57263
81	66	67	24,42	24,42	0,0434	0,04336
82	69	33	235	235	1,96496	1,96354
83	70	68	110,1	108,8	0,8888	0,88802
84	71	47	30,66	26,4	0,41618	0,43209
85	71	56	21,34	25,6	0,93985	0,85378
86	72	29	160	160	0,80841	0,85289
87	73	52	300	300	0,38654	0,38763
88	74	37	160	160	1,13668	1,10877

Tabel 4.6 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Optimasi GSA (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
89	75	70	160	160	0,86412	0,86354
90	76	29	160	160	0,71951	0,75426
91	77	78	39,82	39,82	0,07428	0,07399
92	77	84	103,08	103,08	0,05825	0,05776
93	78	83	9,22	9,22	0,00417	0,00417
94	78	88	-4,96	-4,96	0,00283	0,02807
95	79	84	160	160	0,28574	0,28535
96	80	81	0	0	0,00002	0,00002
97	81	82	0	0	0,00298	0,00298
98	82	87	-4,31	-4,31	0,08724	0,08725
99	83	89	5,2	5,2	0,00058	0,00417
100	84	91	76,64	76,64	0,23743	0,23722
101	85	90	-88,46	-88,46	0,20752	0,20421
102	86	87	-102,67	-102,67	3,40505	3,40442
103	86	94	50,68	50,68	0,0539	0,05389
104	87	96	-137,3	-137,3	1,06172	1,06156
105	88	96	122,2	122,2	1,50145	1,50081
106	88	97	27,1	27,1	0,09742	0,09796
107	90	91	-29,94	-29,94	0,00512	0,00507
108	90	104	-107,24	-107,24	0,08414	0,08326
109	91	92	55,52	55,52	0,11401	0,11386
110	92	99	9,58	9,58	0,00131	0,0013

Tabel 4.6 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Optimasi GSA (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
111	93	94	0	0	0,00012	0,00012
112	94	101	30,44	30,44	0,05527	0,05526
113	95	96	-8,26	-8,26	0,00154	0,00154
114	95	102	1,2	1,2	0,00004	0,00004
115	96	103	2,92	2,92	0,00029	0,00029
116	97	108	24,1	24,1	0,04041	0,04045
117	98	104	37,5	37,5	0,00344	0,00341
118	99	107	4,6	4,58	0,00132	0,00131
119	100	101	-28,98	-28,98	0,05609	0,05608
120	104	105	225,54	225,52	0,65835	0,6569
121	104	112	106,28	106,28	0,3463	0,3471
122	105	106	112,72	112,7	0,082	0,08175
123	106	107	-20,18	-20,2	0,01708	0,01693
124	106	113	85,14	85,14	0,18233	0,1812
125	107	114	-35,47	-35,47	0,16513	0,16332
126	107	120	-10,17	-10,17	0,06069	0,06144
127	108	111	21,62	21,62	0,00741	0,00738
128	109	110	0	0	0,00655	0,00656
129	110	111	-22,72	-22,72	0,16703	0,16711
130	110	115	0	0	0,00275	0,00275
131	111	112	-9,96	-9,96	0,15224	0,15161
132	112	116	95,34	95,32	0,28516	0,28267

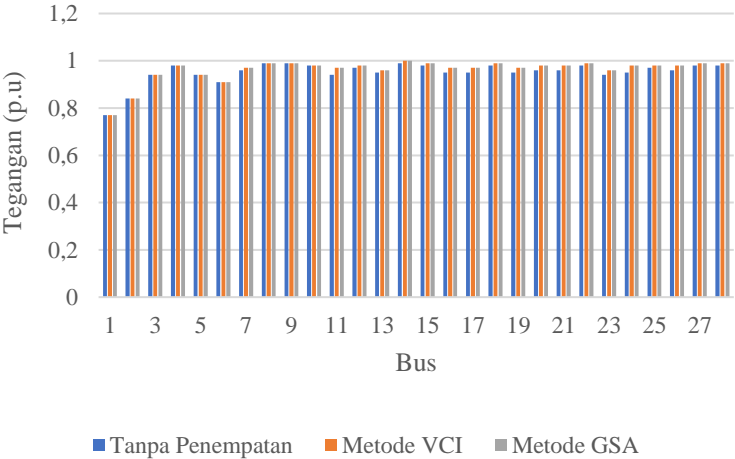
Tabel 4.6 Hasil Aliran Daya Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Optimasi GSA (Lanjutan)

Line	Dari No. Bus	Ke No. Bus	Aliran Daya (MW)		Rugi-Rugi Daya (MW)	
			Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah
133	113	117	74,28	74,26	0,21523	0,21358
134	114	120	4,37	4,37	0,00315	0,00347
135	116	119	91,66	91,66	0,19922	0,19732
136	117	125	15,76	15,74	0,00429	0,0042
137	118	121	0	0	0,00175	0,00176
138	118	122	53,4	53,4	0,0471	0,04702
139	118	123	-68,5	-68,5	0,68421	0,68296
140	119	123	104,28	104,28	0,411	0,41028
141	119	124	98,98	98,98	0,08672	0,08586
142	120	125	84,14	84,12	0,63956	0,63513
143	124	125	-14,8	-14,78	0,01034	0,00952
144	124	126	76,82	76,82	0,05721	0,05711
145	124	127	-20,9	-20,94	0,01948	0,0181
146	131	132	32,08	32,08	0,0949	0,09474
147	132	133	-15,7	-15,7	0,04827	0,04812
148	133	134	-16,8	-16,8	0,01599	0,01606
149	134	135	-17,88	-17,88	0,19422	0,19471
150	135	136	303,64	303,64	3,65404	3,6522
151	135	137	-155,32	-155,34	1,10298	1,1002
152	137	138	26,92	26,92	0,06486	0,06206
153	138	139	80,32	80,36	0,0889	0,08783
154	139	140	23,6	23,62	0,06331	0,07919
155	140	141	-216,38	-188,08	0,90786	0,86723
TOTAL			4681,51	4768,36	132,6106	123,0249

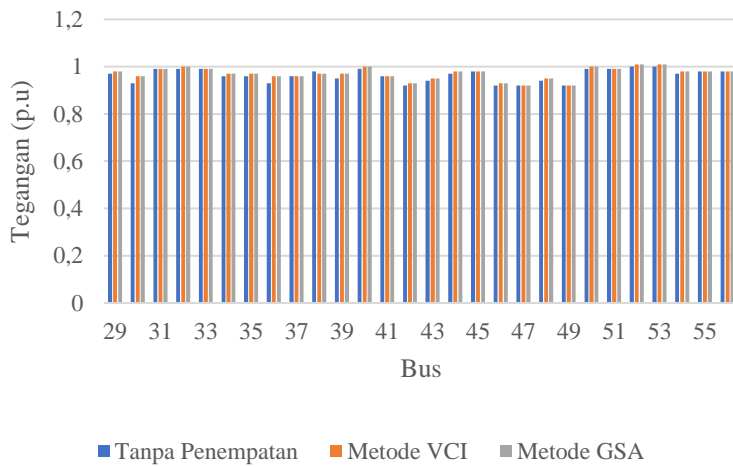
Pada tabel 4.6 diketahui bahwa aliran daya setelah penempatan UPFC dengan metode GSA yaitu 4768,36 MW lebih besar dibandingkan sebelum penempatan UPFC yaitu 4681,51 MW. Dengan optimasi GSA ternyata dapat menaikkan aliran daya sebesar 86,85 MW. Rugi-rugi daya aktif setelah penempatan UPFC dengan metode GSA yaitu 123,0249 MW berkurang dibandingkan sebelum penempatan UPFC yaitu 132,6106 MW. Berdasarkan subbab 4.4, penurunan rugi-rugi daya pada sistem menyebabkan kapabilitas transfer daya meningkat. Sebagian besar saluran mengalami kenaikan aliran daya yang cukup signifikan walaupun terdapat beberapa saluran yang mengalami penurunan daya.

4.6 Analisis Profil Tegangan Setelah Pemasangan UPFC

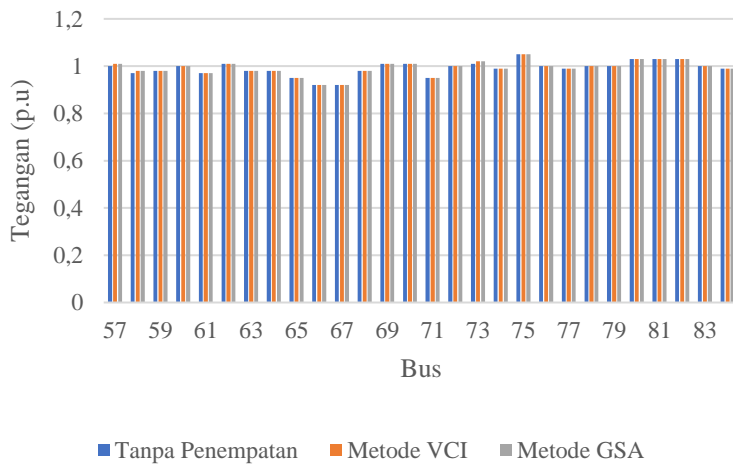
Pada subbab ini akan dijelaskan analisis profil tegangan setelah penempatan UPFC dengan metode VCI dan metode optimasi GSA. gambar 4.7 menunjukkan profil tegangan bus pada sistem setelah penempatan UPFC.



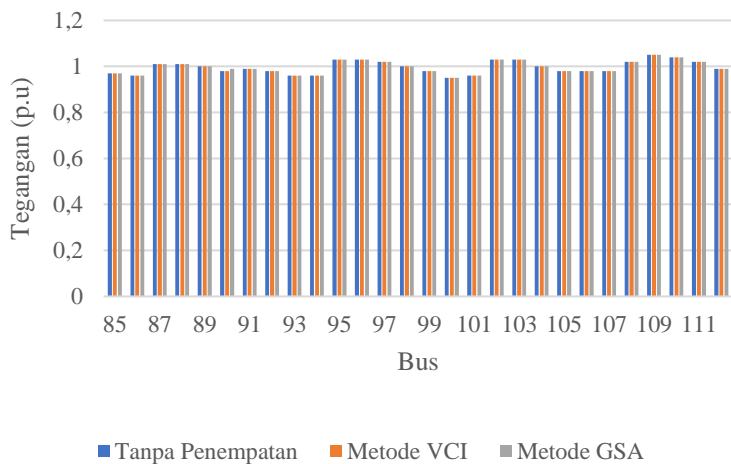
(a)



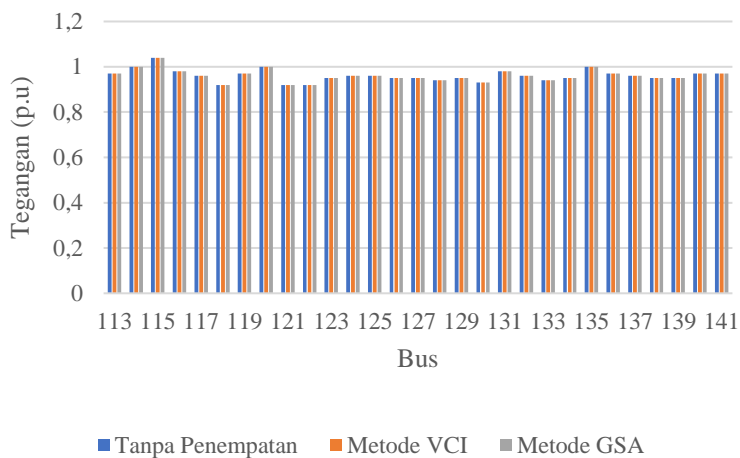
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.3 Grafik Profil Tegangan Setelah Penempatan UPFC dengan Metode VCI dan Metode GSA (a) bus no. 1-28, (b) bus no. 29-56, (c) bus no. 57-84, (d) bus no. 85-112, (e) bus no. 113-141

Pada gambar 4.3 diketahui bahwa dengan penempatan UPFC pada bus Kasongan-Palangkaraya dengan metode VCI maupun dengan metode GSA telah mengalami peningkatan profil tegangan pada sistem. Kenaikan tegangan terbesar terjadi pada bus 30 yaitu New-Palangkaraya dan bus 36 yaitu Palangkaraya, dimana tegangan sebelum penempatan UPFC yaitu 0,934 p.u, setelah penempatan UPFC menjadi 0,961 p.u. Hal ini sesuai dengan referensi [9], bahwa dengan penempatan UPFC pada lokasi optimal, keseluruhan profil tegangan pada sistem dapat ditingkatkan.

4.7 Analisis *Voltage Stability Index* (VSI) pada Saluran Setelah Pemasangan UPFC

Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai analisis peningkatan VSI setelah penempatan UPFC. Berdasarkan referensi [9], dengan penempatan UPFC pada lokasi terpilih, akan meningkatkan nilai VSI pada saluran yang mengalami kontingensi. Tabel 4.7 menunjukkan peningkatan VSI setelah penempatan UPFC.

Tabel 4.7 Nilai VSI Setelah Penempatan UPFC pada Bus Kasongan-Palangkaraya dengan Mempertimbangkan Kontingensi

No	Line	Kontingensi		VSI		Peningkatan VSI (%)
		Dari Bus	Menuju Bus	Awal	Akhir	
1	32	Kasongan	Palangkaraya	0,4830	0,4969	2,869356
2	41	Palangkaraya	Pulpis	0,4691	0,5425	15,646989
3	33	Kasongan	Sampit	0,3497	0,4267	22,022285
4	43	Tanjung	Barikin	0,5069	0,6134	20,998077
5	79	Satui	Asam-3456	0,0346	0,0403	16,411954
6	4	Senggiring	Paritbaru	0,5021	0,5257	4,694859
7	44	Tanjung	Paringin	0,5203	0,6273	20,561597

Pada tabel 4.7 diketahui bahwa dengan penempatan UPFC pada lokasi optimal yaitu pada bus Kasongan-Palangkaraya ternyata dapat menaikkan nilai VSI pada semua saluran yang mengalami kontingensi. Pada tabel 4.7 terlihat peningkatan paling besar terdapat pada saluran 33 yang menghubungkan bus Kasongan-Sampit yaitu sebesar 22,022285%.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan simulasi yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penempatan UPFC yang optimal pada sistem transmisi 275 kVAC Kalimantan tahun 2026 dilakukan dengan mempertimbangkan kasus kontingensi *line outage* dan untuk perbaikan stabilitas tegangan pada sistem.
2. Pada kasus kontingensi *line outage* didapatkan 7 saluran dengan kapasitas diatas 80%, dimana 3 saluran berada pada kondisi *very critical* dan 4 saluran pada kondisi *less critical*. Penempatan UPFC yang optimal terdapat pada saluran 32 yang menghubungkan bus Kasongan-Palangkaraya dengan nilai VCI yaitu 0,02078.
3. Dengan penempatan UPFC pada lokasi optimal, telah meningkatkan aliran daya pada sistem dimana sebelum penempatan UPFC yaitu sebesar 4681,51 MW menjadi 4755,45 MW dengan metode VCI dan dengan metode GSA yaitu sebesar 4768,36 MW. Dengan metode GSA telah meningkatkan aliran daya pada sistem lebih besar dibandingkan metode VCI.
4. Dengan penempatan UPFC pada lokasi optimal dapat meningkatkan nilai VSI pada saluran.
5. Dengan penempatan UPFC pada lokasi optimal, telah meningkatkan keseluruhan profil tegangan pada sistem. Kenaikan tegangan terbesar terdapat pada bus New-Palangkaraya dan bus Palangkaraya. Adapun profil tegangan sebelum penempatan UPFC yaitu 0,934 p.u, setelah penempatan UPFC mengalami kenaikan menjadi 0,961 p.u.

5.2 Saran

Dari hasil analisis dan simulasi yang telah dilakukan, adapun saran yang dapat dilakukan untuk perbaikan dan pengembangan dari simulasi ini adalah sebagai berikut :

1. Diperlukan pengembangan untuk analisis kontingensi dengan kasus kontingensi N-2 ataupun N-k saluran.
2. Diperlukan pengembangan untuk memperbaiki stabilitas tegangan untuk lebih dari satu penempatan UPFC.

3. Menggunakan jenis *FACTS devices* lainnya sehingga dapat dilakukan perbandingan efektivitas antara penggunaan satu jenis *FACTS devices* dan lebih dari satu *FACTS devices*.
4. Menggunakan jenis kecerdasan buatan lainnya untuk analisis penempatan dan penentuan kapasitas *FACTS devices* sekaligus.

DAFTAR PUSTAKA

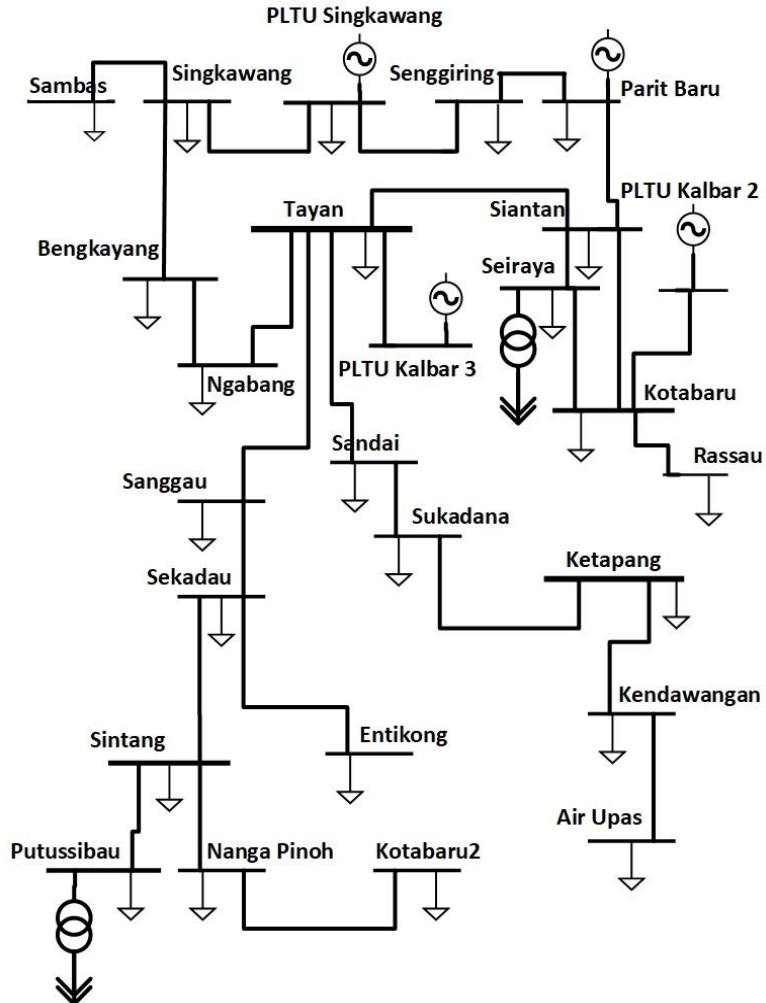
- [1] H. Saadat, *Power System Analysis Third Edition*, 3rd edition. United States: PSA Publishing LLC, 2011.
- [2] M. Rani dan A. Gupta, “*Steady State Voltage Stability Enhancement of Power System Using FACTS Devices*,” dalam *2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON)*, 2014, hlm. 1–6.
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, 1st edition. New York: McGraw-Hill Education, 1994.
- [4] Ontoseno Penangsang, “Analisis Aliran Daya pada Sistem Tenaga Listrik,” 2012.
- [5] Ahmad Hermawan, “Analisis Kontingensi pada Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Aliran Daya,” hlm. 1–6.
- [6] W. Stevenson, *Elements of Power System Analysis*, 4th edition. Auckland; Singapore: McGraw Hill Higher Education, 1982.
- [7] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, hlm. 1387–1401, Agu 2004.
- [8] M. Eremia dan M. Shahidehpour, Ed., *Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control*, 1 edition. Wiley-IEEE Press, 2013.
- [9] P. S. Venkataramu dan A. Thammiah, “*Installation of Unified Power Flow Controller for Voltage Stability Margin Enhancement Under Line Outage Contingencies*,” *Iran. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 5, Jun 2006.
- [10] R. Maharjan dan S. Kamalasadan, “*Voltage Stability Index for Online Voltage Stability Assessment*,” dalam *2015 North American Power Symposium (NAPS)*, 2015, hlm. 1–6.
- [11] L. Gyugyi, “*Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems*,” *Transm. Distrib. IEE Proc. C - Gener.*, vol. 139, no. 4, hlm. 323–331, Jul 1992.
- [12] A. Wirananto, A. Soeprijanto, dan R. Seto Wibowo, “*Peningkatan Available Transfer Capability Menggunakan Unified Power Flow Controller*,” *J. Tek. ITS*, vol. 1, Sep 2012.
- [13] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, dan G. Andersson, “*Use of UPFC for Optimal Power Flow Control*,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 4, hlm. 1629–1634, Okt 1997.
- [14] K. R. Padiyar, *FACTS: Controllers in Power Transmission and Distribution*, 1 edition. Tunbridge Wells: Anshan Publishers, 2009.

- [15] E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, dan S. Saryazdi, “GSA: A *Gravitational Search Algorithm*,” *Inf. Sci.*, vol. 179, no. 13, hlm. 2232–2248, Jun 2009.

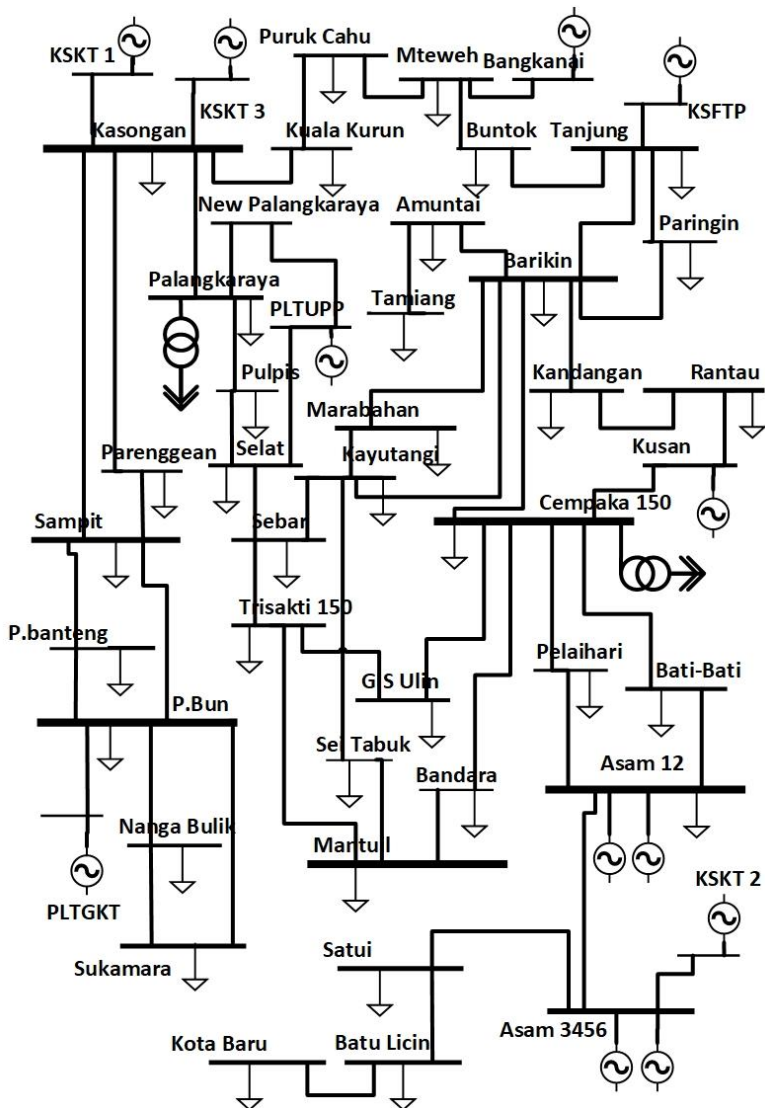
LAMPIRAN

Lampiran 1

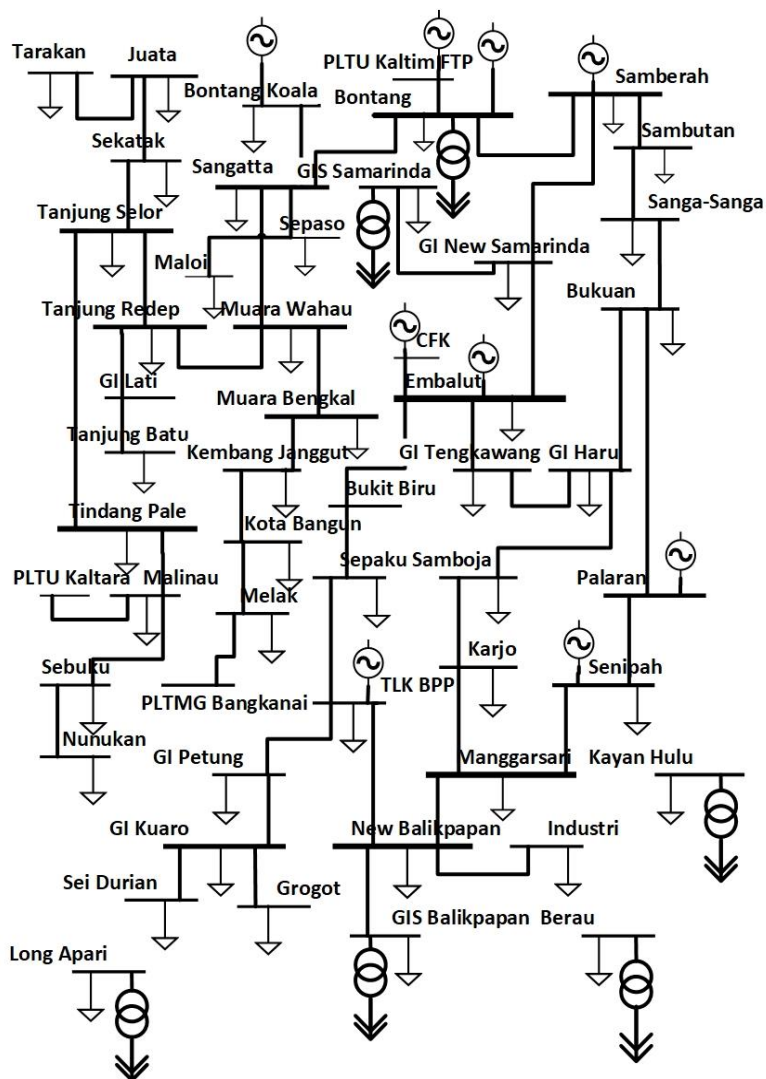
Single Line Diagram Sistem Kalimantan Barat



Single Line Diagram Sistem Kalimantan Selatan dan Tengah (Lampiran)



Single Line Diagram Sistem Kalimantan Timur dan Utara (Lampiran)



Lampiran 2

Data Saluran Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$	Length
			p.u	p.u	p.u	km
1	1	2	0.07234700	0.24886640	0.04403200	275,2
2	2	5	0.09285236	0.31940270	0.05651200	353,2
3	2	6	0.07735768	0.26610260	0.04708160	294,3
4	3	4	0.04434936	0.15255728	0.02699200	168,7
5	3	5	0.01720000	0.05398667	0.00960000	60
6	4	7	0.00526829	0.01812239	0.00320640	40,4
7	6	13	0.02400000	0.11845600	0.03870000	180
8	7	10	0.04837156	0.16639324	0.02944000	184
9	7	11	0.01895955	0.06521892	0.01153920	72,12
10	7	12	0.01043406	0.03589211	0.00635040	79,38
11	8	12	0.00529333	0.03626667	0.01410000	30
12	9	12	0.00529333	0.03626667	0.01410000	30
13	10	13	0.01466667	0.07238978	0.02365000	110
14	10	15	0.04313333	0.18666667	0.06825000	300
15	10	21	0.02588000	0.11200000	0.04095000	180
16	11	16	0.00573333	0.01799556	0.00320000	20
17	12	16	0.00573333	0.01799556	0.00320000	20
18	12	17	0.00862667	0.03733333	0.01365000	60
19	14	10	0.00529333	0.03626667	0.01410000	60
20	15	18	0.02588000	0.11200000	0.04095000	180
21	18	22	0.02875600	0.12444400	0.04550000	200
22	19	20	0.02588000	0.11200000	0.04095000	180

Data Saluran Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026
(Lanjutan)

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$	Length
			p.u	p.u	p.u	Km
23	19	23	0.04313300	0.18666700	0.06825000	300
24	19	24	0.02588000	0.11200000	0.04095000	180
25	20	21	0.01437800	0.06222200	0.02275000	100
26	21	25	0.03738200	0.16177800	0.05915000	260
27	22	28	0.02731800	0.11822200	0.04322500	190
28	24	26	0.02588000	0.11200000	0.04095000	180
29	28	27	0.02731800	0.11822200	0.04322500	190
30	29	31	0.03450700	0.14933300	0.10953900	240
31	29	35	0.01866700	0.09213200	0.06088500	70
32	29	36	0.02000000	0.09871300	0.06523400	150
33	29	38	0.02666700	0.13161800	0.08697800	100
34	29	72	0.01058700	0.07253300	0.05629500	120
35	29	76	0.01058700	0.07253300	0.05629500	120
36	30	36	0.00057300	0.00180000	0.00063700	1
37	30	40	0.05446700	0.17095800	0.06055500	95
38	31	32	0.02818000	0.12195600	0.08945700	196
39	32	33	0.01351500	0.05848900	0.04290300	94
40	33	34	0.02933300	0.14478000	0.09567600	220
41	33	69	0.01437800	0.06222200	0.04564100	100
42	34	37	0.03466700	0.17110300	0.11307200	260
43	35	38	0.01720000	0.05398700	0.01912300	30
44	36	39	0.04873300	0.15296200	0.05418100	85

Data Saluran Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026
(Lanjutan)

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$	Length
			p.u	p.u	p.u	Km
45	36	40	0.05389300	0.16915800	0.05991800	94
46	37	43	0.01725300	0.07466700	0.05477000	60
47	37	48	0.01667800	0.07217800	0.05294400	58
48	37	74	0.01437800	0.06222200	0.04564100	100
49	38	50	0.04946000	0.21404400	0.15700600	172
50	38	52	0.06326200	0.27377800	0.20082200	220
51	38	54	0.02408000	0.07558100	0.02677200	84
52	39	44	0.02207300	0.06928300	0.02454100	38,5
53	40	44	0.01806000	0.05568600	0.02007900	31,5
54	41	43	0.03200000	0.15794100	0.10437400	120
55	41	45	0.03200000	0.15794100	0.10437400	120
56	42	43	0.02103100	0.07234500	0.02541300	80
57	42	46	0.00431300	0.01866700	0.01369200	30
58	43	48	0.00057500	0.00248900	0.00182600	2
59	43	49	0.02401800	0.08261800	0.02902200	45,68
60	43	56	0.12947300	0.44537300	0.15644800	246,25
61	43	45	0.03200000	0.15794100	0.10437400	120
62	44	51	0.02408000	0.07558100	0.02677200	83,55
63	45	51	0.00893800	0.03074700	0.01080000	34
64	45	63	0.00431300	0.01866700	0.01369200	30
65	47	49	0.00057500	0.00248900	0.00182600	2
66	47	71	0.03184600	0.10954800	0.03848200	60,57

Data Saluran Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026
(Lanjutan)

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$	Length
			p.u	p.u	p.u	Km
67	50	52	0.02752000	0.08637900	0.03095600	48
68	51	55	0.00860000	0.02699300	0.00956100	30
69	52	53	0.01006400	0.04355600	0.03194900	35
70	52	57	0.02012900	0.08711100	0.06389800	70
71	52	73	0.00176400	0.01208900	0.00938300	20
72	53	57	0.01006400	0.04355600	0.03194900	35
73	54	58	0.02300400	0.09955600	0.07302600	160
74	55	61	0.00688000	0.02159500	0.00764900	24
75	55	68	0.00435800	0.01885800	0.01383300	30,308
76	56	61	0.00920200	0.03982200	0.02921000	64
77	56	64	0.00345100	0.01493300	0.01095400	24
78	56	59	0.01380700	0.05638900	0.01065300	32,7
79	56	60	0.03284900	0.13416200	0.02534500	77,8
80	56	71	0.07912000	0.24833900	0.08796500	138
81	59	62	0.02410900	0.09846600	0.01860100	59,1
82	60	62	0.00776400	0.01493300	0.01095400	12
83	63	68	0.00431300	0.01866700	0.01369200	30
84	64	68	0.00460100	0.01991100	0.01460500	32
85	65	70	0.04434700	0.13916600	0.04930500	154,7
86	65	66	0.02866700	0.08997800	0.03187100	100
87	66	67	0.02121300	0.06658400	0.02358500	74
88	70	75	0.01058700	0.07253300	0.05629500	120

Data Saluran Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026
(Lanjutan)

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$	Length
			p.u	p.u	p.u	Km
89	62	70	0.00028800	0.00124400	0.00091300	1
90	70	68	0.02933300	0.14478000	0.09568000	220
91	77	78	0.01227300	0.05311300	0.03895900	85,36
92	77	84	0.00143800	0.00622200	0.00456400	10
93	78	83	0.01437800	0.06222200	0.04564100	100
94	78	88	0.01437800	0.06222200	0.04564100	100
95	79	84	0.00431300	0.01866700	0.01369200	30
96	80	81	0.00402600	0.01742200	0.01278000	28
97	81	82	0.01725300	0.07466700	0.05477000	120
98	82	87	0.02933100	0.12693300	0.09310800	102
99	83	89	0.00862700	0.03733300	0.02738500	60
100	84	91	0.01581600	0.06844400	0.05020500	110
101	85	90	0.00431300	0.01866700	0.01369200	30
102	86	87	0.02933100	0.12693300	0.09310800	102
103	86	94	0.00747600	0.03235600	0.02373300	52
104	87	96	0.02300400	0.09955600	0.07302600	160
105	88	96	0.03450700	0.14933300	0.10953900	240
106	88	97	0.03450700	0.14933300	0.10953900	240
107	90	91	0.00352900	0.02417800	0.01876500	40
108	90	104	0.00282300	0.01934200	0.01501200	32
109	91	92	0.01437800	0.06222200	0.04564100	100
110	92	99	0.00103500	0.00448000	0.00328600	7,2

Data Saluran Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026
(Lanjutan)

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$	Length
			p.u	p.u	p.u	Km
111	93	94	0.00705800	0.04835600	0.03753000	80
112	94	101	0.02156700	0.09333300	0.06846200	150
113	95	96	0.00862700	0.03733300	0.02738500	60
114	95	102	0.00575100	0.02488900	0.01825700	40
115	96	103	0.01006400	0.04355600	0.03194900	70
116	97	108	0.02875600	0.12444400	0.09128300	200
117	98	104	0.00086000	0.00269900	0.00095600	3
118	99	107	0.00103500	0.00448000	0.00328600	7,2
119	100	101	0.02242900	0.09706700	0.07120000	156
120	104	105	0.00454300	0.01966200	0.01442300	31,6
121	104	112	0.01175300	0.03689100	0.01306700	41
122	105	106	0.00238700	0.01032900	0.00757600	16,6
123	106	107	0.00688000	0.02159500	0.00764900	24
124	106	113	0.00874200	0.03783100	0.02775000	60,8
125	107	114	0.00575100	0.02488900	0.01825700	20
126	107	120	0.01581600	0.06844400	0.05020500	55
127	108	111	0.00575100	0.02488900	0.01825700	40
128	109	110	0.02875600	0.12444400	0.09128300	200
129	110	111	0.03853200	0.16675600	0.12231900	268
130	110	115	0.02156700	0.09333300	0.06846200	150
131	111	112	0.01725300	0.07466700	0.05477000	120
132	112	116	0.01006400	0.04355600	0.03194900	70

Data Saluran Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026
(Lanjutan)

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$	Length
			p.u	p.u	p.u	Km
133	113	117	0.01294000	0.05600000	0.04107700	90
134	114	120	0.01006400	0.04355600	0.03194900	35
135	116	119	0.00718900	0.03111100	0.02282100	50
136	117	125	0.00609600	0.02638200	0.01935200	42,4
137	118	121	0.02012900	0.08711100	0.06389800	140
138	118	122	0.00460100	0.01991100	0.01460500	32
139	118	123	0.04701300	0.14756400	0.05226900	164
140	119	123	0.01299800	0.05624900	0.04126000	90,4
141	119	124	0.00575100	0.02488900	0.01825700	40
142	120	125	0.02674300	0.11573300	0.08489300	186
143	124	125	0.00768300	0.02411400	0.00427075	26,8
144	124	126	0.00286700	0.00899800	0.00318700	10
145	124	127	0.00287600	0.01244400	0.00912800	20
146	131	132	0.01012900	0.08198300	0.53788000	400
147	132	133	0.00379800	0.03074400	0.20170500	150
148	133	134	0.00268400	0.02172600	0.14253800	106
149	134	135	0.00759700	0.06148800	0.40341000	300
150	135	136	0.00759700	0.06148800	0.40341000	300
151	135	137	0.00101300	0.00819800	0.05378800	280
152	137	138	0.00215200	0.01742100	0.11429900	85
153	138	139	0.00240600	0.01947100	0.12774600	95
154	139	140	0.00936900	0.07583500	0.49753900	370

Data Saluran Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026
(Lanjutan)

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$	Length
			p.u	p.u	p.u	Km
155	140	141	0.00455800	0.03689300	0.24204600	180
156	141	142	0.00278500	0.02254500	0.14791700	110
157	142	143	0.00726800	0.05882300	0.38592900	287
158	143	131	0.00582400	0.04714000	0.30928100	213

Lampiran 3

Data Transformator Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$
			p.u	p.u	p.u
159	144	4	0.00226000	0.09497000	0.00000000
160	145	4	0.00226000	0.09497000	0.00000000
161	146	4	0.00226000	0.09497000	0.00000000
162	147	4	0.00226000	0.09497000	0.00000000
163	148	4	0.00226000	0.09497000	0.00000000
164	149	4	0.00226000	0.09497000	0.00000000
165	150	5	0.00226000	0.09497000	0.00000000
166	151	5	0.00226000	0.09497000	0.00000000
167	152	5	0.00278000	0.09496000	0.00000000
168	153	5	0.00278000	0.09496000	0.00000000
169	154	5	0.00226000	0.09497000	0.00000000
170	155	5	0.00226000	0.09497000	0.00000000
171	156	6	0.00226000	0.09497000	0.00000000
172	157	8	0.00226000	0.09497000	0.00000000
173	158	9	0.00226000	0.09497000	0.00000000
174	159	14	0.00226000	0.09497000	0.00000000
175	160	14	0.00226000	0.09497000	0.00000000
176	161	76	0.00226000	0.09497000	0.00000000
177	162	76	0.00226000	0.09497000	0.00000000
178	163	72	0.00226000	0.09497000	0.00000000
179	164	72	0.00226000	0.09497000	0.00000000

Data Transformator Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$
			p.u	p.u	p.u
180	165	69	0.00226000	0.09497000	0.00000000
181	166	69	0.00226000	0.09497000	0.00000000
182	167	69	0.00226000	0.09497000	0.00000000
183	168	69	0.00226000	0.09497000	0.00000000
184	169	69	0.00226000	0.09497000	0.00000000
185	170	69	0.00226000	0.09497000	0.00000000
186	171	40	0.00230000	0.09500000	0.00000000
187	172	40	0.00230000	0.09500000	0.00000000
188	173	38	0.00278000	0.09496000	0.00000000
189	174	38	0.00278000	0.09496000	0.00000000
190	175	51	0.00230000	0.09500000	0.00000000
191	176	74	0.00226000	0.09497000	0.00000000
192	177	74	0.00226000	0.09497000	0.00000000
193	178	73	0.00190000	0.09498000	0.00000000
194	179	73	0.00190000	0.09498000	0.00000000
195	180	56	0.00226000	0.09497000	0.00000000
196	181	62	0.00226000	0.09497000	0.00000000
197	182	62	0.00226000	0.09497000	0.00000000
198	183	70	0.00226000	0.09497000	0.00000000
199	184	70	0.00226000	0.09497000	0.00000000
200	185	71	0.00230000	0.09500000	0.00000000
201	186	75	0.00190000	0.09498000	0.00000000

Data Transformator Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$
			p.u	p.u	p.u
202	187	77	0.00226000	0.09497000	0.00000000
203	188	77	0.00226000	0.09497000	0.00000000
204	189	79	0.00226000	0.09497000	0.00000000
205	190	79	0.00226000	0.09497000	0.00000000
206	191	88	0.00226000	0.09497000	0.00000000
207	192	88	0.00226000	0.09497000	0.00000000
208	193	84	0.00278000	0.09496000	0.00000000
209	194	84	0.00278000	0.09496000	0.00000000
210	195	98	0.00278000	0.09496000	0.00000000
211	196	98	0.00278000	0.09496000	0.00000000
212	197	104	0.00226000	0.09497000	0.00000000
213	198	104	0.00226000	0.09497000	0.00000000
214	199	91	0.00278000	0.09496000	0.00000000
215	200	91	0.00278000	0.09496000	0.00000000
216	201	96	0.00190000	0.09498000	0.00000000
217	202	96	0.00190000	0.09498000	0.00000000
218	203	104	0.00278000	0.09496000	0.00000000
219	204	104	0.00278000	0.09496000	0.00000000
220	205	104	0.00278000	0.09496000	0.00000000
221	206	104	0.00226000	0.09497000	0.00000000
222	207	104	0.00226000	0.09497000	0.00000000
223	208	114	0.00226000	0.09497000	0.00000000

Data Transformator Sistem Transmisi 275 kVAC Kalimantan Tahun 2026 (Lanjutan)

No Line	From Bus	To Bus	R'	X'	$\frac{1}{2} B$
			p.u	p.u	p.u
225	210	120	0.00226000	0.09497000	0.00000000
224	209	114	0.00226000	0.09497000	0.00000000
225	210	120	0.00226000	0.09497000	0.00000000
226	211	120	0.00226000	0.09497000	0.00000000
227	212	120	0.00226000	0.09497000	0.00000000
228	213	119	0.00226000	0.09497000	0.00000000
229	214	119	0.00226000	0.09497000	0.00000000
230	11	131	0.00290000	0.14497000	0.00000000
231	23	132	0.00290000	0.14497000	0.00000000
232	128	133	0.00290000	0.14497000	0.00000000
233	129	134	0.00290000	0.14497000	0.00000000
234	96	135	0.00290000	0.14497000	0.00000000
235	130	136	0.00290000	0.14497000	0.00000000
236	84	137	0.00290000	0.14497000	0.00000000
237	85	138	0.00290000	0.14497000	0.00000000
238	127	139	0.00290000	0.14497000	0.00000000
239	56	140	0.00290000	0.14497000	0.00000000
240	36	141	0.00290000	0.14497000	0.00000000
241	38	142	0.00290000	0.14497000	0.00000000
242	22	143	0.00290000	0.14497000	0.00000000

Halaman ini sengaja dikosongkan.

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Denny Aprianus Situmorang, biasanya dipanggil Denny. Lahir di Jakarta, tanggal 11 Desember 1995 dan saat ini berusia 22 tahun. Merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Harapan Situmorang dan Ibu Asna Simanullang dan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis menempuh jenjang pendidikan SD di SD Negeri 01 Pagi Cibubur Jakarta Timur pada tahun 2002-2008, melanjutkan jenjang pendidikan SMP di SMP Negeri 147 Jakarta pada tahun 2008-2011 dan melanjutkan jenjang pendidikan SMA di SMA Negeri 48 Jakarta pada tahun 2011-2014. Penulis melanjutkan pendidikan S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan mengambil jurusan Teknik Elektro. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Apabila ingin menghubungi penulis dapat melalui email : dennyaprianus1295@gmail.com

Halaman ini sengaja dikosongkan.